

การจำลองกระบวนการของการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์จาก  
เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การจำลองกระบวนการของการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์จาก  
เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน



จินต์จุฑา พิชัยภาพ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIMULATION OF SYNTHETIC FUEL PRODUCTION FROM  
A PROTON-CONDUCTING SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน  
โดย นางสาวจินต์จุฑา พิชัยภาพ  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ  
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

---

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ  
(ผศ.ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ)

.....กรรมการ  
(ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุกรณ์)

.....กรรมการ  
(ดร.ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมใจ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาานิพนธ์	การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน
นักศึกษา	นางสาวจินต์จุฑา พิชัยภาพ
รหัสประจำตัว	57010183
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์	ผศ.ดร.ญานีพร พ็ชรวรโชติ

### บทคัดย่อ

เชื้อเพลิงสังเคราะห์ เช่น มีเทน เมทานอล ไดเมทิลอีเทอร์ และเชื้อเพลิงเหลว เป็นเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตได้จากแก๊สสังเคราะห์ ทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ คือ เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนด้วยการแยกคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำด้วยการอิเล็กโทรไลซิสผ่านกระแสไฟฟ้า และหากกระแสไฟฟ้านั้นผลิตจากพลังงานหมุนเวียนก็สามารถกล่าวได้ว่าวิธีการนี้เป็นการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำโดยไม่ปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มอีกทั้งยังสามารถลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในธรรมชาติได้อีกด้วย โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการผลิตมีเทนและการผลิตเมทานอลจากแก๊สสังเคราะห์ที่มาจากการผลิตด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน โดยการใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Aspen Plus™ ผลของสภาวะดำเนินงานในเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน เช่น อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิและความดัน ถูกพิจารณาเพื่อหาสภาวะดำเนินงานที่เหมาะสม ผลการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม คือ 4.69 3.52 0.53 และ 1.29 ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งค่าดังกล่าวเหมาะสำหรับการนำแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ไปผลิตมีเทน เมทานอล ไดเมทิลอีเทอร์ และเชื้อเพลิงเหลวตามลำดับ และควรดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะต่ำลงที่อุณหภูมิสูงขึ้นและความดันไม่ส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จากนั้นจะทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันในกระบวนการผลิตมีเทนและเมทานอล พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตมีเทนคือที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 250 องศาเซลเซียสและความดันสูง 3 บรรยากาศ และสำหรับเมทานอลคือที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 250 องศาเซลเซียสและความดันสูง 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรยากาศ ภายใต้ภาวะการดำเนินงานดังกล่าวจะผลิตมีเทนและเมทานอลได้ในปริมาณ 0.2 กิโลโมลต่อชั่วโมง และ 0.13 กิโลโมลต่อชั่วโมง ตามลำดับ และในกระบวนการผลิตมีเทนไม่ก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการนำแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนมาผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และไม่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Simulation of Synthetic Fuel Production from a Proton-Conducting Solid Oxide Electrolysis Cell
Student	Miss Jinjutha Bhichaiphab
Student ID.	57010183
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2017
Advisor	Asst. Prof. Dr. Yaneeporn Patcharaworachot

### Abstract

Synthetic fuels, i.e., methane methanol dimethylether and liquid fuel, can be produced from synthesis gas. One of attractive methods for synthesis gas production is a proton-conducting solid oxide electrolysis cell (H-SOEC) in which carbon dioxide and steam are separated by electrolysis through electricity. If the electricity generated from renewable energy, this method will become an environmental friendly method since it does not release carbon dioxide during production and also can reduce carbon dioxide in nature. This project aims to develop the model of methane production from synthesis gas produced by a H-SOEC. The simulation was performed by using the Aspen Plus™ simulation software. The effect of operating conditions in H-SOEC, such as steam to carbon dioxide molar ratio, temperature and pressure were examined to find optimal condition. The simulation result showed that the optimal steam to carbon dioxide molar ratio is 4.69, 3.52, 0.53 and 1.29 at 650 °C and 1 atm that satisfying for methane, methanol, dimethylether and liquid fuel production, respectively. H-SOEC should be operated at high temperature since under this operation, the lowest cell potential can be provided and pressure does not effected to cell potential. Then, the effect of operating temperature and pressure in methane and methanol production processes was studied. The results indicated that the optimal operating condition of methane production is 250 °C and 3 atm whereas that for methanol production is 250 °C and 80 atm. Under these operating condition, the methane and methanol can be produced as 0.2 kmol/h and 0.13 kmol/h, respectively. In methane production does not release

carbon dioxide to nature, so methane production is more attractive than methanol production for synthetic fuel production from a Proton-Conducting Solid Oxide Electrolysis Cell.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ญาณิพร พ็ชรวรโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโทที่ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ความช่วยเหลือ และแนวทางในการแก้ไขปรับปรุงงาน ตลอดจนให้การสนับสนุนทุกๆ ด้านจนทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ และ ดร.ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไข ทำให้ปริญญาโทฉบับนี้มีความสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนาม ที่อบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจตลอดมา หากปริญญาโทฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับและขออภัยไว้ ณ ที่นี้ คุณความดีที่เกิดจากงานนี้ ขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จินต์จุฑา พิชัยภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XII
สัญลักษณ์.....	XVIII

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แก๊สสังเคราะห์.....	4
2.2 เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง.....	5
2.2.1 เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	6
2.2.2 แบบจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	7
2.3 กระบวนการผลิตมีเทน.....	11
2.4 กระบวนการผลิตเมทานอล.....	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13

2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง..... 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเมทานอลและเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	13
2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตมีเทนและเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง .....	14

**บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน .....** 15

3.1 การจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์.....	15
3.1.1 การผลิตแก๊สสังเคราะห์ .....	15
3.1.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับข้อมูลการทดลอง .....	17
3.2 การจำลองกระบวนการผลิตมีเทน .....	19
3.3 การจำลองกระบวนการผลิตเมทานอล.....	20
3.4 การศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ.....	22

**บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการจำลองกระบวนการ .....** 25

4.1 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์กับข้อมูลการทดลอง .....	25
4.2 ผลของสภาวะดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	26
4.2.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์.....	26
4.2.2 ผลของอุณหภูมิดำเนินงาน .....	31
4.2.3 ผลของความดันดำเนินงาน .....	32
4.3 ผลของสภาวะดำเนินงานของถังฟลัช.....	34
4.3.1 ผลของอุณหภูมิดำเนินงาน .....	34
4.3.2 ผลของความดันดำเนินงาน.....	35
4.4 ผลของสภาวะดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทน .....	36
4.4.1 ผลของอุณหภูมิดำเนินงาน .....	36
4.4.2 ผลของความดันดำเนินงาน.....	37

4.5 ผลของสภาวะดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอล .....	38
4.5.1 ผลของอุณหภูมิดำเนินงาน .....	38
4.5.2 ผลของความดันดำเนินงาน .....	39
4.6 ผลการเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ .....	39
<b>บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>41</b>
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	41
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	42
เอกสารอ้างอิง .....	43
ภาคผนวก.....	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แล VIII องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่สำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างสารสององค์ประกอบ.....	10
ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์เลขชี้กำลังและพลังงานก่อกัมมันต์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แลกเปลี่ยน.....	11
ตารางที่ 4.1 ปริมาณสัมพัทธ์ที่เหมาะสมกับการนำแก๊สสังเคราะห์ไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ต่างๆ และอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม.....	30
ตารางที่ 4.2 อัตราการไหลเชิงโมลของแต่ละองค์ประกอบในแก๊สผลิตภัณฑ์.....	34
ตารางที่ 4.3 สภาพดำเนินงานที่เหมาะสมสำหรับการผลิตมีเทนและเมทานอล.....	40
ตารางที่ 4.4 อัตราการไหลของแต่ละองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์.....	40
ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิต แก๊สสังเคราะห์กับข้อมูลการทดลอง.....	49
ตารางที่ 2 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาณสัมพัทธ์.....	50
ตารางที่ 3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์.....	50
ตารางที่ 4 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์.....	51
ตารางที่ 5 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานต่ออัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์.....	51
ตารางที่ 6 ผลของความดันดำเนินงานต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์.....	51
ตารางที่ 7 ผลของความดันดำเนินงานต่ออัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์.....	51
ตารางที่ 8 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานต่ออัตราการไหลของน้ำ.....	52
ตารางที่ 9 ผลของความดันดำเนินงานต่ออัตราการไหลของน้ำ.....	52
ตารางที่ 10 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานต่ออัตราการไหลของมีเทน.....	53
ตารางที่ 11 ผลของความดันดำเนินงานต่ออัตราการไหลของมีเทน.....	53
ตารางที่ 12 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานต่ออัตราการไหลของเมทานอล.....	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และXองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญญรูป

รูปที่ 2.1 เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง ก) แบบนำโปรตอน ข) แบบนำออกไซด์ไอออน.....	6
รูปที่ 3.1 เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตรอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์....	15
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลการทดลองสำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตรอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์.....	18
รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการผลิตมีเทนจากแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	19
รูปที่ 3.4 แผนภาพกระบวนการผลิตเมทานอลจากแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	20
รูปที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตรอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์กับข้อมูลการทดลอง.....	26
รูปที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อปริมาณสัมพัทธ์ ก) เปลี่ยนอัตราการไหลของไอน้ำ ข) เปลี่ยนอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์.....	27
รูปที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่ออัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ก) เปลี่ยนอัตราการไหลของไอน้ำ ข) เปลี่ยนอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์.....	28
รูปที่ 4.4 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำที่มีต่อคาร์บอนไดออกไซด์ต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์.....	29
รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานที่มีต่อ ก) ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ข) อัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์.....	32
รูปที่ 4.6 ผลของความดันดำเนินงานที่มีต่อ ก) ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ข) อัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์.....	33
รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานที่มีต่ออัตราการไหลของน้ำที่แยกได้ เมื่อถึงแพลสดำเนินงานที่ความดัน 1 บรรยากาศ.....	35

รูปที่ 4.8 ผลของความดันดำเนินงานที่มีต่ออัตราการไหลของน้ำที่แยกได้ เมื่อถึงแฟลชดำเนินงานที่  
 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....36

รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานที่มีต่ออัตราการไหลของมีเทน ณ ความดัน 1 บรรยากาศ.....37

รูปที่ 4.10 ผลของความดันดำเนินงานที่มีต่ออัตราการไหลของมีเทน ณ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส  
 .....37

รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานที่มีต่ออัตราการไหลของเมทานอล ณ ความดัน 60 บรรยากาศ  
 .....38

รูปที่ 4.12 ผลของความดันดำเนินงานที่มีต่ออัตราการไหลของเมทานอล ณ อุณหภูมิ 250 องศา  
 เซลเซียส.....39



# สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำจำกัดความ	หน่วย
$A$	พื้นที่ผิวของเซลล์	$m^2$
$D_i^{eff}$	สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลขององค์ประกอบ $i$	$m^2/s$
$D_{i,j}$	สัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างสารสององค์ประกอบ $i$ และ $j$	$m^2/s$
$D_{i,k}$	สัมประสิทธิ์การแพร่ในรูพรุนขององค์ประกอบ $i$	$m^2/s$
$E$	ศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้	V
$E^0$	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน	V
$E_{electrode}$	พลังงานก่อกัมมันต์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนที่ขั้วอิเล็กโทรด	$kJ/mol$
$F$	ค่าคงที่ของฟาราเดย์	$C/mol$
$j$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	$A/m^2$
$j_{0,electrode}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน	$A/m^2$
$k_B$	ค่าคงที่ของ Boltzmann	$J/K$
$k_{electrode}$	สัมประสิทธิ์เลขชี้กำลังของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนที่ขั้วอิเล็กโทรด	$\Omega^{-1}m^{-2}$
$M_i$	มวลโมเลกุลขององค์ประกอบ $i$	$g/mol$
$N_{cell}$	จำนวนเซลล์	cells
$\dot{n}_i$	อัตราการไหลเชิงโมลขององค์ประกอบ $i$	$kmol/h$
$P$	ความดันดำเนินงาน	atm
$P_i$	ความดันย่อยขององค์ประกอบ $i$	atm
$P_i^{TPB}$	ความดันย่อยขององค์ประกอบ $i$ ที่รอยต่อระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับอิเล็กโทรไลต์	atm
$R$	ค่าคงที่สากลของแก๊ส	$J/mol\cdot K$ และ $L\cdot atm/mol\cdot K$
$R_{ohm}$	ความต้านทานของเซลล์ไฟฟ้า	$\Omega$
$r$	รัศมีรูพรุนเฉลี่ย	m
$S$	ค่าปริมาณสัมพันธ์	-
$T$	อุณหภูมิดำเนินงาน	K
$V$	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์	V
$X$	ค่าการแปลงผันทางเคมี	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา เล. XIII บังอาจถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์กรีก	คำจำกัดความ	หน่วย
$\Omega_D$	ผลรวมการชนกันเนื่องจากการแพร่	-
$\xi$	ความพรุนของขั้วอิเล็กโทรด	-
$\eta_{act}$	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น	$m^2$
$\eta_{conc}$	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	V
$\eta_{ohm}$	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า	V
$\rho_{anode}$	ค่าการนำไฟฟ้าของขั้วแอโนด	$\Omega^{-1}m^{-1}$
$\rho_{electrolyte}$	ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์	$\Omega^{-1}m^{-1}$
$\rho_{cathode}$	ค่าการนำไฟฟ้าของขั้วแคโทด	$\Omega^{-1}m^{-1}$
$\sigma_i$	ความยาวคุณลักษณะขององค์ประกอบ i	Å
$\sigma_{i,j}$	ความยาวคุณลักษณะเฉลี่ยขององค์ประกอบ i และ j	Å
$\tau_{anode}$	ค่าความหนาของขั้วแอโนด	m
$\tau_{cathode}$	ค่าความหนาของขั้วแคโทด	m
$\tau_{electrolyte}$	ค่าความหนาของอิเล็กโทรไลต์	m
$\emptyset$	ความคดเคี้ยวของขั้วอิเล็กโทรด	-



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

แก๊สสังเคราะห์ (Syngas หรือ Synthesis gas) เป็นแก๊สเชื้อเพลิงผสม ซึ่งมีส่วนผสมหลักประกอบไปด้วย ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ถูกใช้เป็นสารมัธยันตร์ (Intermediate) ที่สำคัญในการผลิตแก๊สธรรมชาติสังเคราะห์ (Synthetic Natural Gas, SNG) แอมโมเนีย ไดมethylเอเทอร์ เชื้อเพลิงเหลว และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน เมทานอล เอทานอล เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นตัวกลางในการผลิตปิโตรเลียมสังเคราะห์เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือสารหล่อลื่นอีกด้วย [1]

เชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากแก๊สสังเคราะห์เกิดขึ้นในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 และเป็นเทคโนโลยีที่สมบูรณ์ สำหรับวัตถุประสงค์ในการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีความต้องการอัตราส่วนโมเลกุลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกันตามเชื้อเพลิงที่ต้องการให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยทั่วไปแล้วแก๊สสังเคราะห์จะผลิตโดยวิธีแปรสภาพเป็นแก๊สของถ่านหิน (Coal Gasification) และการเปลี่ยนรูปโดยใช้ไอน้ำ (Steam Reforming) แต่ทั้งสองวิธีนี้เป็นการใช้พลังงานที่ไม่สามารถหมุนเวียนได้ อีกทั้งยังปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอีกด้วย [2] ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีนักวิจัยบางส่วนให้ความสนใจกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Electrolyzer Cell, SOEC) ซึ่งเป็นการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากการผ่านกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) เข้าไปยังคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ เนื่องจากเป็นการจัดเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ จึงสามารถลดภาวะโลกร้อนได้ [3]

โดยปกติเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งสามารถแบ่งตามชนิดของอิเล็กโทรไลต์ได้ 2 ประเภท คือ เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน (Proton-conducting solid oxide electrolysis cell, SOEC- $H^+$ ) และเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกไซด์ไอออน (Oxide-ion-conducting solid oxide electrolysis cell, SOEC- $O^{2-}$ ) อย่างไรก็ตามเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนนำไอออนได้ดีกว่าที่อุณหภูมิปานกลางจึงทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงและสามารถเลือกใช้วัสดุได้หลากหลายมากกว่า [4] และยังสามารถผลิตได้ที่เข้มข้นกว่าแบบนำออกไซด์ไอออนเนื่องจากไม่ถูกเจือจางด้วยไอน้ำขาเข้า [5]

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ พบว่าแก๊สสังเคราะห์ราว 50 เปอร์เซ็นต์ถูกเปลี่ยนเป็นมีเทน [6] เนื่องจากมีเทนเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่สะอาดที่สุดที่เอกลำโพงอันยิ่งใหญ่แห่งนั้นแล้วที่บรรดาบรรพบุรุษของเราได้คิดค้นขึ้นเมื่อหลายพันปีก่อนหน้านี้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ประสิทธิภาพสูงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน สะดวกในการจัดเก็บ และมีระบบรองรับการขนส่ง มีเทนอยู่แล้วในหลายๆประเทศทั่วโลก ดังนั้น ในโครงการนี้จึงสนใจการแปรสภาพแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งเป็นมีเทนเพื่อให้สะดวกในการขนส่งและการจัดเก็บมากยิ่งขึ้น และทำให้มีเทนที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้เป็นเชื้อเพลิงที่สามารถหมุนเวียนได้และมีความยั่งยืน [7]

นอกจากนั้นการผลิตเมทานอลจากแก๊สสังเคราะห์ก็ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเมทานอลเป็นหนึ่งในสินค้าที่ถูกใช้มากที่สุดในโลก ด้วยความต้องการสูงถึง 61.4 ล้านตัน [8] อีกทั้งยังใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือใช้เป็นตัวทำละลายอย่างแพร่หลายในหลากหลายอุตสาหกรรม [9] นอกจากนี้เมทานอลยังเป็นเชื้อเพลิงที่มีความน่าสนใจทางเศรษฐศาสตร์ อีกทั้งยังง่ายและปลอดภัยในการจัดเก็บอีกด้วย [10]

ดังนั้นในโครงการนี้จึงสนใจศึกษากระบวนการแปรสภาพแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนไปเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ได้แก่ มีเทน และ เมทานอล โดยมีจุดประสงค์เพื่อหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตมีเทน

## 1.2 วัตถุประสงค์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษากระบวนการผลิตมีเทนและเมทานอลจากแก๊สสังเคราะห์ที่มาจากการผลิตด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus หาสภาวะดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและกระบวนการผลิตมีเทนและกระบวนการผลิตเมทานอล และเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 พัฒนาแบบจำลองของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยโปรแกรมซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Aspen Plus™ และเปรียบเทียบผลจากการจำลองกับข้อมูลการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของภาวะดำเนินงานต่างๆที่มีต่อเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน รายละเอียดดังนี้

- 1) อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 0.5 1 2 3 4 และ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) อุณหภูมิดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่อุณหภูมิ 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส
- 3) ความดันดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่มีความดัน 1.5 และ 10 บรรยากาศ

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของภาวะดำเนินงานต่างๆที่มีต่อกระบวนการผลิตมีเทนและกระบวนการผลิตเมทานอล โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) อุณหภูมิดำเนินงานของถังแฟลชในช่วง 40 ถึง 100 องศาเซลเซียส
- 2) ความดันดำเนินงานของถังแฟลชในช่วง 1 ถึง 10 บรรยากาศ
- 3) อุณหภูมิดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทนในช่วง 250 ถึง 400 องศาเซลเซียส
- 4) ความดันดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทนในช่วง 1 ถึง 3 บรรยากาศ
- 5) อุณหภูมิดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอลในช่วง 250 ถึง 280 องศาเซลเซียส
- 6) ความดันดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอลในช่วง 60 ถึง 80 บรรยากาศ

1.3.4 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์

## 1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

- 1.4.1 สามารถออกแบบและจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนได้
- 1.4.2 ทราบภาวะดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์เพื่อการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์
- 1.4.3 ทราบภาวะดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตมีเทนอย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.4.4 ทราบภาวะดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตเมทานอลอย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.4.5 สามารถเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 แก๊สสังเคราะห์

แก๊สสังเคราะห์เป็นแก๊สเชื้อเพลิงผสม ซึ่งมีส่วนผสมหลักประกอบไปด้วย ไฮโดรเจน และ คาร์บอนมอนอกไซด์ ใช้เป็นสารมัธยันตร์ในการผลิตไฮโดรเจน แก๊สธรรมชาติสังเคราะห์ แอมโมเนีย ไดมethylอีเทอร์ เชื้อเพลิงเหลว และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน เมทานอล เอทานอล เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นตัวกลางในการผลิตปิโตรเลียมสังเคราะห์เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือสารหล่อลื่นอีกด้วย

แก๊สสังเคราะห์สามารถผลิตได้หลากหลายวิธี เช่น จากกระบวนการเปลี่ยนรูปโดยใช้ไอน้ำ (Steam Reforming) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic) และต้องการอุณหภูมิสูง การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ต้องการอุณหภูมิต่ำและความดันสูง วิธีการนี้จะให้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 2 [11] ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงเหลวต่อไป การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการออกซิเดชันที่มีรีฟอร์มมิง เป็นการรวมกระบวนการเปลี่ยนรูปโดยใช้ไอน้ำและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนไว้ด้วยกัน โดยความร้อนที่ใช้ในกระบวนการนั้นมาจากกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน จึงทำให้วิธีการนี้มีข้อดีคือใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการเปลี่ยนรูปโดยใช้ไอน้ำ และการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเลือก เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันแก๊สซิฟิเคชันของคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สหุงต้มด้วยไฮโดรเจนจากการแยกไอน้ำด้วยไฟฟ้า [12]

แก๊สสังเคราะห์ที่ได้เป็นสารผสมซึ่งสัดส่วนองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ต่างกันจะเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานที่ต่างกัน ดังนั้น จึงต้องมีการคำนวณค่าปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric number, S) ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (2.1) และค่าอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (2.2) เพิ่มเติมเพื่อใช้ในการพิจารณาการนำแก๊สสังเคราะห์ไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ชนิดต่างๆ เช่น ปริมาณสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตมีเทนและเมทานอลคือ 2 [13] และ 3 [14] ตามลำดับ อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไดเมทิลอีเทอร์และเชื้อเพลิงเหลวคือ 1 [15] และ 2 [16] ตามลำดับ

$$S = \frac{\dot{n}_{H_2} - \dot{n}_{CO_2}}{\dot{n}_{CO} + \dot{n}_{CO_2}} \quad (2.1)$$

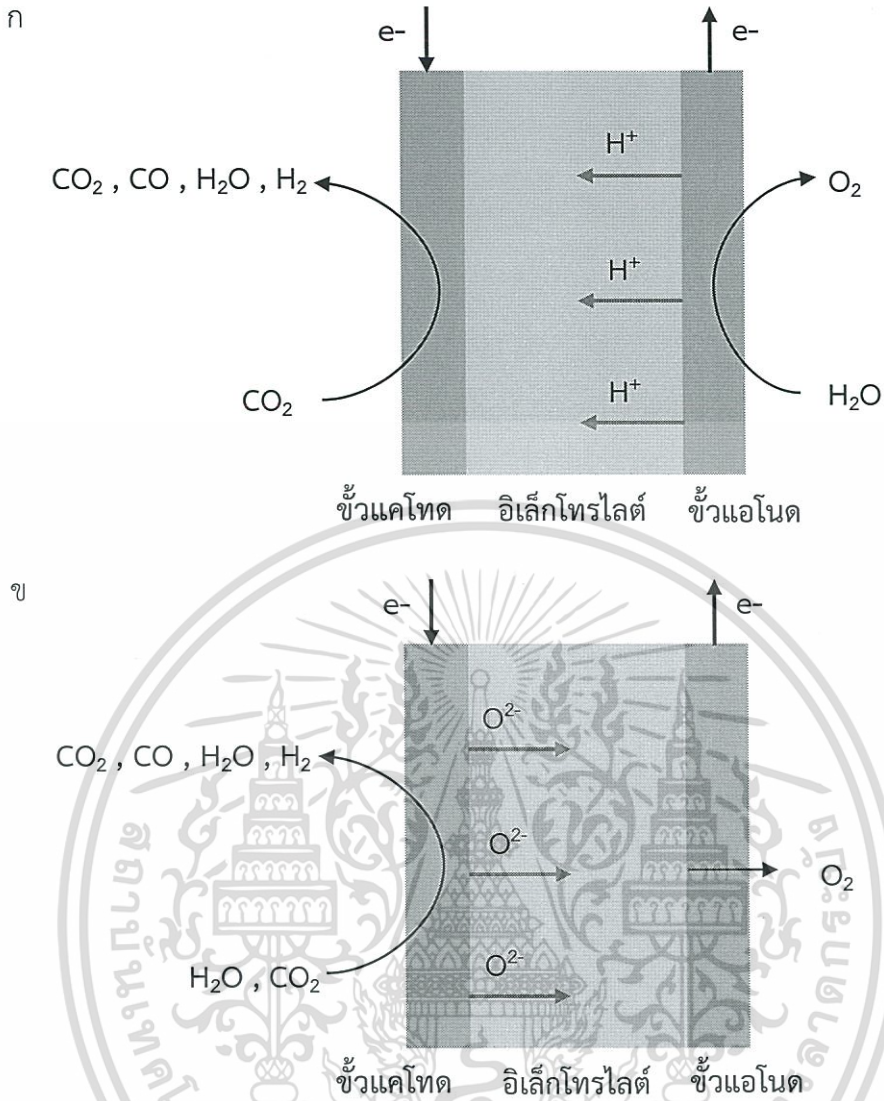
$$\text{อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์} = \frac{\dot{n}_{H_2}}{\dot{n}_{CO}} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\dot{n}_i$  = อัตราการไหลเชิงโมลขององค์ประกอบ  $i$

## 2.2 เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง

เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Electrolyzer Cell, SOEC) เป็นเซลล์อิเล็กโทรไลซิสที่ใช้ไฟฟ้าในการแยก เช่น แยกไอน้ำเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน กล่าวคือเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเคมี เซลล์ชนิดนี้เป็นการทำงานแบบตรงกันข้ามกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) เซลล์ชนิดนี้อาจใช้ในการผลิตไฮโดรเจนจากกระแสไฟฟ้าส่วนเกินที่ได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น ลม เป็นต้น ดังนั้น เมื่อความต้องการใช้ไฮโดรเจนในตลาดลดลงก็สามารถใช้เซลล์เชื้อเพลิงเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าได้อีกครั้ง เช่นเดียวกันหากมีกระแสไฟฟ้ามากเกินก็สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไฮโดรเจนเพื่อรอใช้ประโยชน์ต่อไป [17]

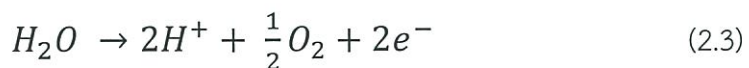
นอกจากนี้เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งยังสามารถผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์จากการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิสพร้อมกับการแยกไอน้ำได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับไอน้ำ คือ สารผสมระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือแก๊สสังเคราะห์ โดยทั่วไปเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ ขั้วแอโนด (Anode) ขั้วแคโทด (Cathode) และอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของเซลล์ตามอิเล็กโทรไลต์ได้ 2 ประเภท ได้แก่ อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกไซด์ไอออน (Oxide-ion conducting electrolytes) และอิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการทำโปรตอน (Proton-conducting electrolytes) ซึ่งลักษณะการดำเนินของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็ง ก) แบบนำโปรตอน ข) แบบนำออกไซด์ไอออน

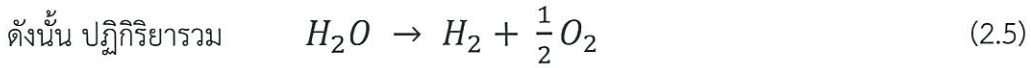
### 2.2.1 เซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

งานวิจัยส่วนใหญ่ก่อนหน้านี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกไซด์ไอออน อย่างไรก็ตามเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนนำไอออนได้ดีกว่าที่อุณหภูมิปานกลาง (300-700 องศาเซลเซียส) ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูง จึงสามารถเลือกใช้วัสดุได้หลากหลายมากกว่า และยังได้ผลิตภัณฑ์ที่เข้มข้นกว่าแบบนำออกไซด์ไอออนเนื่องจากไม่ถูกเจือจางด้วยไอน้ำขาเข้า ดังรูปที่ 2.1ก ไอน้ำจะถูกป้อนเข้าที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นโปรตอน ออกซิเจน และอิเล็กตรอน ดังสมการ



และอิเล็กโทรไลต์จะนำโปรตอนผ่านไปยังขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อป้อนคาร์บอนไดออกไซด์เข้าที่ขั้วแคโทดพร้อมกับป้อนไอน้ำเข้าที่ขั้วแอโนด จะเกิดปฏิกิริยา วอเตอร์แก๊สชิฟต์แบบย้อนกลับ (Reverse Water Gas Shift) เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์และไอน้ำ ดังสมการ



### 2.2.2 แบบจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน [18]

งานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม Aspen Plus<sup>TM</sup> ในการจำลองกระบวนการ ซึ่งอาศัยหลักการทางอุณหพลศาสตร์ในการคำนวณสมดุลเคมี โดยมีสมมติฐานของแบบจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ดังนี้

- 1) แบบจำลองคำนวณแบบไร้มิติ (Zero Dimension)
- 2) แบบจำลองพิจารณาที่สภาวะคงตัว (Steady state)
- 3) แก๊สมีพฤติกรรมแบบแก๊สอุดมคติ (Ideal gas)
- 4) คาร์บอนมอนอกไซด์ผลิตจากปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์แบบย้อนกลับเท่านั้น

การคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Cell Voltage, V) เราสามารถคำนวณได้ตามทฤษฎีโดยอาศัยสมการของเนิร์นสต์ (Nernst equation) แสดงได้ดังสมการที่ (2.7) และค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานแสดงดังสมการที่ (2.8)

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right) \quad (2.7)$$

$$E^0 = 1.253 - 0.00024516T \quad (2.8)$$

เมื่อ  $E$  = ศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้ (Reversible potential)

$E^0$  = ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน

$R$  = ค่าคงที่สากลของแก๊ส

$T$  = อุณหภูมิดำเนินงาน

$F$  = ค่าคงที่ของฟาราเดย์

$P_i$  = ความดันย่อยขององค์ประกอบ (Partial pressure)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในความเป็นจริงแล้วจะมีการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในเซลล์ ดังนั้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจริงของเซลล์จึงมีค่าดังสมการ

$$V = E + \sum \eta_{conc} + \sum \eta_{act} + \eta_{ohm} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\eta_{conc}$  = ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration overpotential)  
 $\eta_{act}$  = ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Activation overpotential)  
 $\eta_{ohm}$  = ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic overpotential)

โดยคำนิยามและสมการของศักย์ไฟฟ้าสูญเสียแต่ละชนิด แสดงดังนี้

(1) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น เป็นการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากความเข้มข้นของสารลดลงที่พื้นผิวระหว่างขั้วแอโนด-อิเล็กโทรไลต์ และที่ขั้วแคโทด-อิเล็กโทรไลต์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.10)

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{2F} \ln \left[ \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^{TPB}} \right) \left( \frac{P_{O_2}^{TPB}}{P_{O_2}} \right)^{1/2} \right] + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{P_{H_2}^{TPB}}{P_{H_2}} \right] \quad (2.10)$$

โดย  $P^{TPB}$  คือ ความดันย่อยขององค์ประกอบที่ขอบเขตสามเฟส (Partial pressure at the triple phase boundary) ซึ่งสามารถหาได้จากแบบจำลองการแพร่ของ Fick ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{H_2O}^{TPB} = P_{H_2O} - \frac{RT\tau_{anode} j}{2FD_{H_2O}^{eff}} \quad (2.11)$$

$$P_{O_2}^{TPB} = P_{O_2} + \frac{RT\tau_{anode} j}{4FD_{O_2}^{eff}} \quad (2.12)$$

$$P_{H_2}^{TPB} = P - (P - P_{H_2}) \exp\left(-\frac{RT\tau_{cathode} j}{2FD_{H_2}^{eff}}\right) \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\tau_{anode}$  = ค่าความหนาของขั้วแอโนด  
 $\tau_{cathode}$  = ค่าความหนาของขั้วแคโทด  
 $D_i^{eff}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective diffusion coefficient) ขององค์ประกอบ  $i$  ซึ่งสามารถหาได้จากสมการของ Bosanquet ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{1}{D_i^{eff}} = \frac{\phi}{\xi} \left( \frac{1}{D_{i,j}} + \frac{1}{D_{i,k}} \right) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\xi$  = ความพรุนของซั้วอิเล็กโทรด  
 $\emptyset$  = ความคดเคี้ยวของซั้วอิเล็กโทรด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\emptyset = \left(\frac{3-\xi}{2}\right)^{1/2} \quad (2.15)$$

$D_{i,j}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างสารสององค์ประกอบ (Binary diffusion coefficient) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.16) – (2.20)

$D_{i,k}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ในรูพรุน (Knudsen diffusion coefficient) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.21)

$$D_{i,j} = \frac{0.00266T^{3/2}}{PM_{i,j}^{1/2}\sigma_{i,j}^2\Omega_D} \quad (2.16)$$

$$M_{i,j} = 2\left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j}\right)^{-1} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $M_i$  = มวลโมเลกุลขององค์ประกอบ  $i$   
 $\sigma_{i,j}$  = ความยาวคุณลักษณะเฉลี่ย (Mean characteristic length) ขององค์ประกอบ  $i$  และ  $j$  ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\sigma_{i,j} = \frac{\sigma_i + \sigma_j}{2} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\sigma_i$  = ความยาวคุณลักษณะขององค์ประกอบ  $i$   
 $\Omega_D$  = ผลรวมการชนกันเนื่องจากการแพร่ (Diffusion collision integral) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.19) – (2.20)

$$\Omega_D = \frac{1.06036}{\Gamma^{0.15610}} + \frac{0.19300}{\exp(0.47635\Gamma)} + \frac{1.03587}{\exp(1.52996\Gamma)} + \frac{1.76474}{\exp(3.89411\Gamma)} \quad (2.19)$$

$$\Gamma = \frac{k_B T}{(\varepsilon_1 \varepsilon_2)^{1/2}} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $k_B$  = ค่าคงที่ของ Boltzmann ซึ่งค่าของ  $\sigma_i$  และ  $\varepsilon_i/k_B$  แสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่ในรูพรุน สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$D_{i,k} = \frac{2}{3} \left( \frac{8RT}{\pi M_i} \right)^{1/2} r \quad (2.21)$$

เมื่อ  $r$  = รัศมีรูพรุนเฉลี่ย

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่สำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างสารสององค์ประกอบ

	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
$\sigma_i$ (Å)	2.641	2.827	3.467	3.690	3.941
$\epsilon_i/k_B$ (K)	809.1	59.7	106.7	91.7	195.2

(2) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี สามารถคำนวณได้จากสมการของ Butler-Volmer ดังสมการที่ (2.22) อย่างไรก็ตามสมการนี้ยากต่อการคำนวณจึงถูกจัดรูปใหม่โดยกำหนดให้  $\alpha = 0.5$  และ  $n = 2$  ได้ดังสมการที่ (2.23)

$$j = j_{0,electrode} \left( e^{\frac{\alpha n F \eta_{act}}{RT}} - e^{-\frac{(1-\alpha) n F \eta_{act}}{RT}} \right) \quad (2.22)$$

$$\eta_{act} = \frac{RT}{F} \ln \left( \frac{j}{2j_{0,electrode}} + \sqrt{\frac{j^2}{4j_{0,electrode}^2} + 1} \right) \quad (2.23)$$

เมื่อ  $j$  = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density)

$j_{0,electrode}$  = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน (Exchange current density)

ที่ขั้วอิเล็กโทรด สามารถหาได้จากสมการที่ (2.24)

$$j_{0,electrode} = \frac{RT}{2F} k_{electrode} \exp \left( -\frac{E_{electrode}}{RT} \right) \quad (2.24)$$

เมื่อ  $k_{electrode}$  = สัมประสิทธิ์เลขชี้กำลังของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนที่ขั้วอิเล็กโทรด

$E_{electrode}$  = พลังงานก่อกัมมันต์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนที่ขั้วอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์เลขชี้กำลังและพลังงานก่อกัมมันต์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แลกเปลี่ยน

	สัมประสิทธิ์เลขชี้กำลัง ( $\Omega^{-1}m^{-2}$ )	พลังงานก่อกัมมันต์ (กิโลจูลต่อโมล)
ขั้วแอโนด	$2.802 \times 10^5$	53.123
ขั้วแคโทด	$8.569 \times 10^5$	56.739

(3) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า เป็นผลจากความต้านทานต่อการถ่ายเทไฟฟ้าและไอออนผ่านขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.25) – (2.26) โดยปกติค่าการนำไฟฟ้าของขั้วแอโนดและแคโทดจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์ ในการคำนวณความต้านทานของเซลล์ไฟฟ้าจึงไม่คำนึงถึงขั้วแอโนดและแคโทด

$$\eta_{ohm} = j \times R_{ohm} \quad (2.25)$$

$$R_{ohm} = \frac{\tau_{anode}}{\rho_{anode}} + \frac{\tau_{electrolyte}}{\rho_{electrolyte}} + \frac{\tau_{cathode}}{\rho_{cathode}} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $R_{ohm}$  = ความต้านทานของเซลล์ไฟฟ้า  
 $\tau_{electrolyte}$  = ค่าความหนาของอิเล็กโทรไลต์  
 $\rho_{anode}$  = ค่าการนำไฟฟ้าของขั้วแอโนด  
 $\rho_{electrolyte}$  = ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์  
 $\rho_{cathode}$  = ค่าการนำไฟฟ้าของขั้วแคโทด

### 2.3 กระบวนการผลิตมีเทน [7]

ปฏิกิริยาการเกิดมีเทนสามารถเกิดขึ้นได้จากไฮโดรเจนและออกไซด์ของคาร์บอน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งทั้งหมดนี้ก็เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับไอน้ำในเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง มีปฏิกิริยาที่เป็นปฏิกิริยาหลักในการผลิตมีเทน ดังนี้

1) ปฏิกิริยาซาบาเทียร์ (Sabatier Reaction) ซึ่งเป็นกระบวนการรีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ไฮโดรเจน แสดงดังสมการที่ (2.27) สารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาต้องการเพียงไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2) ปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation reaction) ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Reverse of steam methane reforming, SMR) เพราะเดิมที่ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam Reforming reaction) จะเป็นการแยกไฮโดรเจนออกจากมีเทนเพื่อนำเอาไฮโดรเจนที่ได้มาใช้ประโยชน์ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงประเภทออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell : SOFC) แต่ในปฏิกิริยานี้จะเป็นการนำคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนหรือแก๊สสังเคราะห์มาผลิตเป็นมีเทน ดังสมการที่ (2.28)



ซึ่งทั้ง 2 ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและเกิดช้าลงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 250 ถึง 400 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 1 ถึง 2 บรรยากาศ [19]

## 2.4 กระบวนการผลิตเมทานอล

เมทานอลสามารถผลิตได้โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ (2.29) โดยอัตราส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไฮโดรเจนที่เหมาะสม คือ 1 ต่อ 2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (2.30) ซึ่งก็เป็นผลิตภัณฑ์นอกเหนือจากแก๊สสังเคราะห์ ที่เกิดจากการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับไอน้ำในเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง



ซึ่งทั้ง 2 ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเช่นเดียวกับปฏิกิริยาในการผลิตมีเทน อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 250 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 60 ถึง 80 บรรยากาศ [20]

ปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.27) – (2.30) เป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ซึ่งน้ำเป็นผลิตภัณฑ์และในการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะมีน้ำ

เกิดขึ้นรวมอยู่ในแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องแยกน้ำออกก่อนนำแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยาเนื่องจากอาจส่งผลให้สมดุลเลื่อนไปทางสารตั้งต้น

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง

Jensen, S. และคณะ [21] ทดสอบเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC) ในช่วงความดัน 0.4 บาร์ ถึง 10 บาร์ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส พื้นที่ที่ใช้งานของเซลล์ 16 ตารางเซนติเมตร จากผลการทดลองพบว่า เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ความดัน 10 บาร์ มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ความดัน 4 บาร์ ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งพบว่าได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนความดันในช่วงความดันนี้น้อยมากๆ กล่าวคือเมื่อเพิ่มความดันแรงดันไฟฟ้าของเซลล์จะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งที่ความดันดำเนินงานสูงก็ยังคงเป็นที่น่าสนใจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความดันนั้นจะทำให้ความต้านทานภายในของเซลล์ลดลงด้วย

### 2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเมทานอลและเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

Namwong, L. และคณะ [18] ศึกษาการดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนในการผลิตแก๊สสังเคราะห์สำหรับนำไปใช้ในการผลิตเมทานอลโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus จากการศึกษาผลของโครงสร้างรองรับจากการจำลองกระบวนการ พบว่า เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่รองรับด้วยขั้วแคโทดต้องการศักย์ไฟฟ้าของเซลล์น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่รองรับด้วยอิเล็กโทรไลต์และขั้วแอโนด และเมื่อศึกษาผลของภาวะดำเนินงาน พบว่า อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีศักยภาพในการผลิตเมทานอลคือประมาณ 3.9 ที่อุณหภูมิและความดันคงที่ คือ 650 องศาเซลเซียส 1 บรรยากาศ นอกจากนี้ยังพบว่า ภาวะการดำเนินงานที่ดีที่สุดสำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน คือ การดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ และจากการหาค่าภาวะดำเนินงานที่เหมาะสม พบว่า ที่อัตราการไหลของไอน้ำ 7.71 กิโลโมลต่อชั่วโมง อุณหภูมิดำเนินงาน 650 องศาเซลเซียส และความดันดำเนินงาน 1 บรรยากาศ จะทำให้ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ต่ำที่สุดที่ 4.73 โวลต์ โดยใช้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดที่ 1.94 กิโลโมลต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตมีเทนและเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง

Stempien, J. และคณะ [7] ศึกษาการผลิตมีเทนจากพลังงานทดแทนและคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง เป็นการรวมเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งเข้ากับกระบวนการสังเคราะห์มีเทนซึ่งประกอบไปด้วยปฏิกิริยาซาบาเทียร์ ปฏิกิริยาการเกิดมีเทน และปฏิกิริยาออกซิเดชันแก๊สซิฟิเคชัน งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิดำเนินงาน ความดันดำเนินงาน และอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้า ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานทั้งหมด ปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ และอัตราส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จะอยู่ในช่วง 71.64 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ถึง 81.08 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานทั้งหมดสูงสุดที่ได้จะอยู่ในช่วง 44.07% ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ถึง 60.87 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณมีเทนที่ผลิตได้มากที่สุดที่ได้จะอยู่ในช่วง 0.58 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ถึง 1.52 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และ อัตราส่วนการใช้ไปของคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

## วิธีดำเนินงาน

โครงการนี้ทำการศึกษากระบวนการผลิตมีเทนจากแก๊สสังเคราะห์ที่มาจากกรอเล็กโทรไลซิสของไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ในเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus โดยมุ่งเน้นที่จะหาสภาวะดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและกระบวนการผลิตมีเทน ในบทที่ 3 จะแบ่งหัวข้อออกเป็น 4 ส่วน หัวข้อที่ 3.1 จะแสดงการจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ หัวข้อที่ 3.2 จะแสดงการจำลองการผลิตมีเทน หัวข้อที่ 3.3 จะแสดงการจำลองการผลิตมีเทน และหัวข้อที่ 3.4 จะแสดงการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ

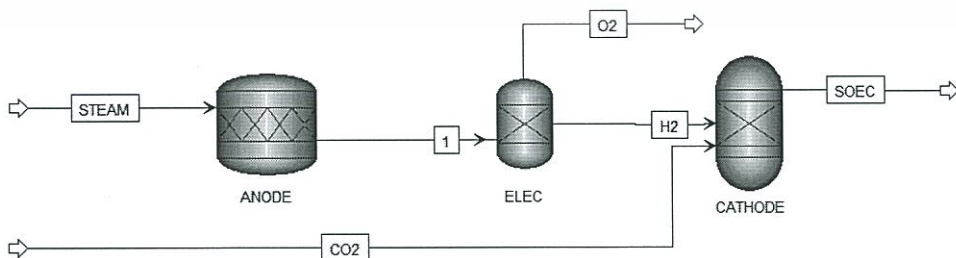
### 3.1 การจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์

#### 3.1.1 การผลิตแก๊สสังเคราะห์

โดยรูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพของแบบจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบในแผนภาพแสดงดังต่อไปนี้

#### 1) สารตั้งต้น

สารตั้งต้นประกอบด้วยไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยป้อนไอน้ำเข้าที่ขั้วแอโนด ด้วยสายการไหล STEAM และคาร์บอนไดออกไซด์เข้าที่ขั้วแคโทดด้วยสายการไหล CO<sub>2</sub> อย่างไรก็ตามใน



รูปที่ 3.1 เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตรอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์

การป้อนไอน้ำจะต้องมีการป้อนไฮโดรเจนร่วมด้วยเพื่อลดความดันย่อยของเซลล์ซึ่งส่งผลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ [22] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ห้องประกอบของสายการไหล STEAM ประกอบไปด้วยไอน้ำ 95 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

## 2) ขั้วแอโนด

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของไอน้ำจะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด ดังสมการที่ (2.3) ในการจำลองกระบวนการจะใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิด RStoic แทนการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของไอน้ำ เนื่องจากทราบค่าอัตราการใช้น้ำ (Steam utilization) หรือค่าการแปลงผันทางเคมี (Conversion, X) ของน้ำซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและอัตราการไหลของไอน้ำขาเข้า ดังสมการ

$$X = \frac{iAN_{cell}}{2F\dot{n}_{steam,in}} \quad (3.1)$$

เมื่อ	X	= ค่าการแปลงผันทางเคมี
	A	= พื้นที่ผิวของเซลล์
	$N_{cell}$	= จำนวนเซลล์
	$\dot{n}_{steam,in}$	= อัตราการไหลเชิงโมลของไอน้ำขาเข้า

## 3) อิเล็กโทรไลต์

ในงานวิจัยนี้เป็นเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตรอน ดังนั้นอิเล็กโทรไลต์ในที่นี้จะยอมให้โปรตอนเท่านั้นที่จะผ่านไปยังขั้วแคโทดได้ ในการจำลองกระบวนการจึงแทนด้วยแบบจำลองเครื่องแยกชนิด Sep เพื่อแยกเอาออกซิเจนออกจากกระบวนการด้วยสายการไหล O<sub>2</sub> ก่อนส่งไฮโดรเจนบริสุทธิ์ทำปฏิกิริยาต่อที่ขั้วแคโทดด้วยสายการไหล H<sub>2</sub>

## 4) ขั้วแคโทด

เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ถูกป้อนเข้าไปยังขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยาออกเตอร่ากซ์และแก๊สซิฟิเคชันแบบย้อนกลับกับแก๊สไฮโดรเจน ดังสมการที่ (2.6) เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์และไอน้ำ หรือแก๊สสังเคราะห์ ในการจำลองกระบวนการจะใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิด RGibbs เนื่องจากไม่ทราบค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา และไม่ทราบค่าแปลงผันทางเคมี โดยแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิด RGibbs จะทำการคำนวณหาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะสมดุลจากวิธีการพลังงานอิสระของกิบส์ที่น้อยที่สุด (Minimum Gibbs free energy)

## 5) ผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตรอนในสายการไหล SOEC จะประกอบไปด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์และไอน้ำจากปฏิกิริยาออกเทอร์แกสซิฟแบบย้อนกลับ และไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา จึงทำให้แก๊สสังเคราะห์ที่ได้เป็นสารผสมซึ่งสัดส่วนองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ต่างกันจะเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานที่ต่างกัน พิจารณได้จากค่าปริมาณสัมพันธ์ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (2.1) และค่าอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหมาะสม

ในการตั้งค่าของโปรแกรมซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Aspen Plus™ จำเป็นต้องเลือกสมการสถานะ (Equation of state) เพื่อใช้ในการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งในการวิจัยนี้เลือกใช้สมการสถานะของแก๊สอุดมคติ (IDEAL) เนื่องจากแก๊สมีพฤติกรรมคล้ายแก๊สอุดมคติเมื่อดำเนินงานที่สถานะความดันต่ำและอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ในการคำนวณศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ สมการที่ (2.7) – (2.26) จะถูกเขียนเพิ่มในกล่องการคำนวณ (Calculation block) โดยใช้ภาษา FORTAN ดังแสดงในภาคผนวก

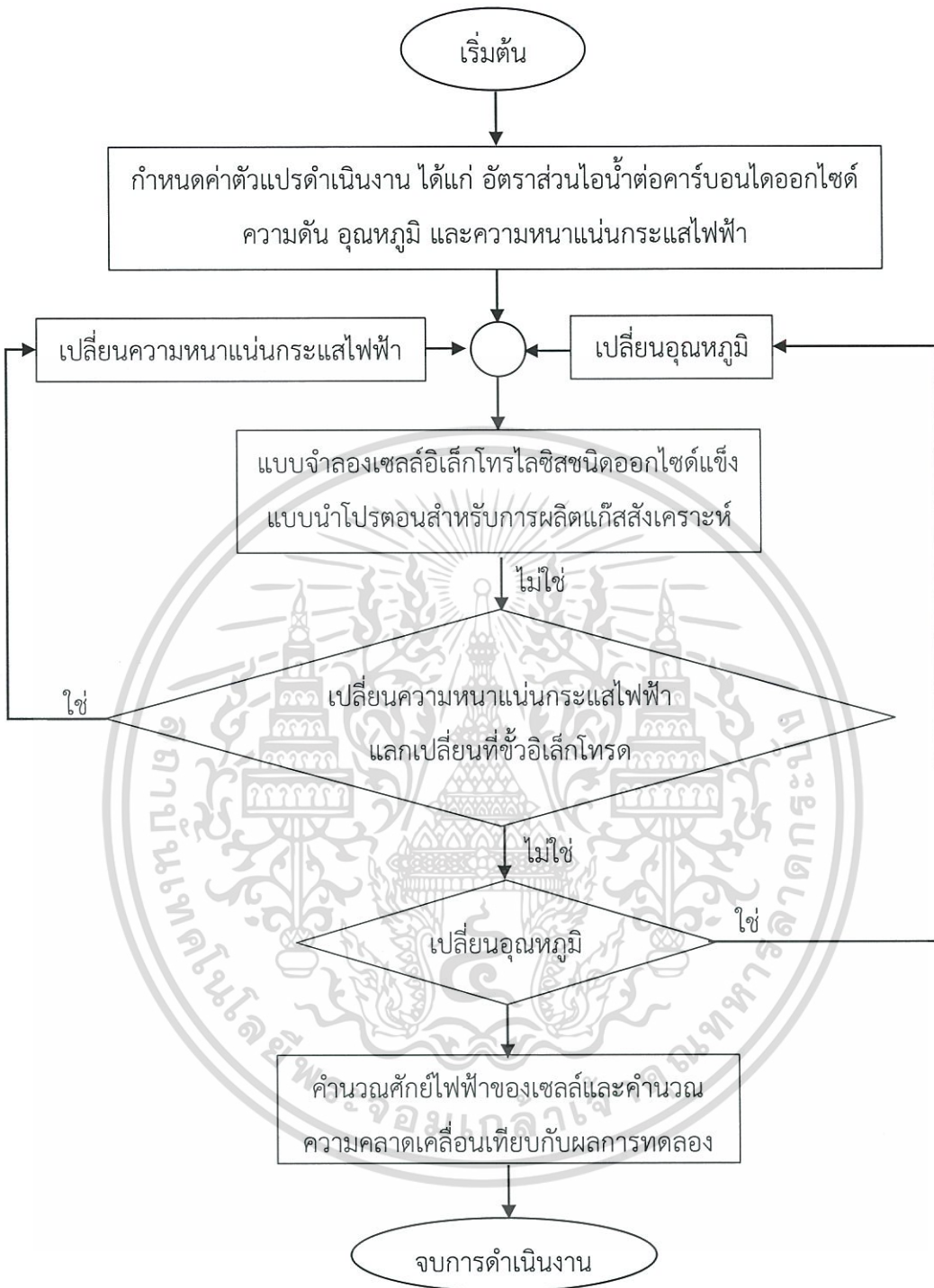
### 3.1.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับข้อมูลการทดลอง

หลังจากสร้างแบบจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตรอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์แล้ว ผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการจะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองในงานวิจัยของ Ruiz-Trejo และ Irvine [22] ซึ่งใช้ Pt เป็นขั้วอิเล็กโทรดหนา 100 ไมโครเมตร และใช้  $\text{BaCe}_{0.5}\text{Zr}_{0.3}\text{Y}_{0.16}\text{Zn}_{0.04}\text{O}_{3.8}$  (BCZY) เป็นอิเล็กโทรไลต์หนา 200 ไมโครเมตร โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) กำหนดอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 1
- 2) กำหนดความดันดำเนินงานเป็น 1 บรรยากาศ
- 3) กำหนดอุณหภูมิดำเนินงานเป็น 550 องศาเซลเซียส
- 4) กำหนดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็น 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
- 5) จำลองกระบวนการด้วยแบบจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตรอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ค่าการนำไอออนที่อิเล็กโทรไลต์จากงานวิจัยของ Ruiz-Trejo และ Irvine [16] และใช้อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำ ออกซิเจน และไฮโดรเจนจากสายการไหล STEAM 1 และ SOEC ตามลำดับ ในการคำนวณศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และใช้
- 6) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5) แต่เปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็น 200 400 600 และ 800 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
- 7) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 4) - 6) แต่เปลี่ยนอุณหภูมิดำเนินงานเป็น 600 และ 650 องศาเซลเซียส
- 8) เปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับข้อมูลการทดลองของ

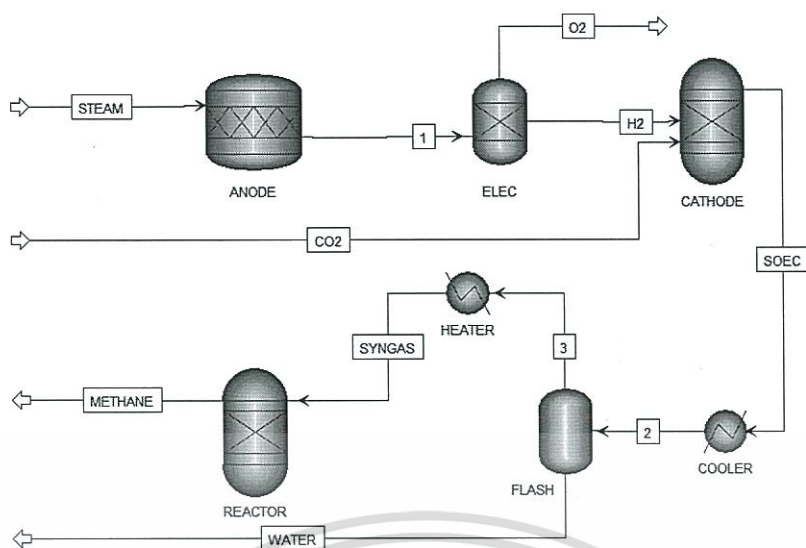
Ruiz-Trejo และ Irvine [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลการทดลองสำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการผลิตมีเทนจากแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

### 3.2 การจำลองกระบวนการผลิตมีเทน

รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตมีเทนจากแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน โดยรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบในแผนภาพแสดงดังต่อไปนี้

#### 1) อุปกรณ์ลดอุณหภูมิ

ใช้ในการลดอุณหภูมิของแก๊สสังเคราะห์ผสมที่ออกมาจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน เนื่องจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะดำเนินงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิปานกลาง แต่การแยกน้ำออกจากแก๊สสังเคราะห์ผสมด้วยวิธีการแฟลชจะทำได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากต้องทำให้น้ำอยู่ในสถานะของเหลว จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการลดอุณหภูมิก่อนเข้าสู่กระบวนการแยกน้ำ

#### 2) ถังแฟลช

เพื่อแยกน้ำออกจากแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนก่อนนำไปผลิตเป็นมีเทน จะแยกโดยใช้ถังแฟลชซึ่งอาศัยความแตกต่างของสถานะของสาร ซึ่งจะต้องลดอุณหภูมิลงให้น้ำอยู่ในสถานะของเหลว ส่วนแก๊สสังเคราะห์ที่อยู่ในสถานะแก๊ส แล้วแยกน้ำออกไปด้วยสายการไหล WATER ส่วนแก๊สสังเคราะห์ที่ได้นั้นจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทนด้วยสายการไหล SYNGAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) อุปกรณ์เพิ่มอุณหภูมิ

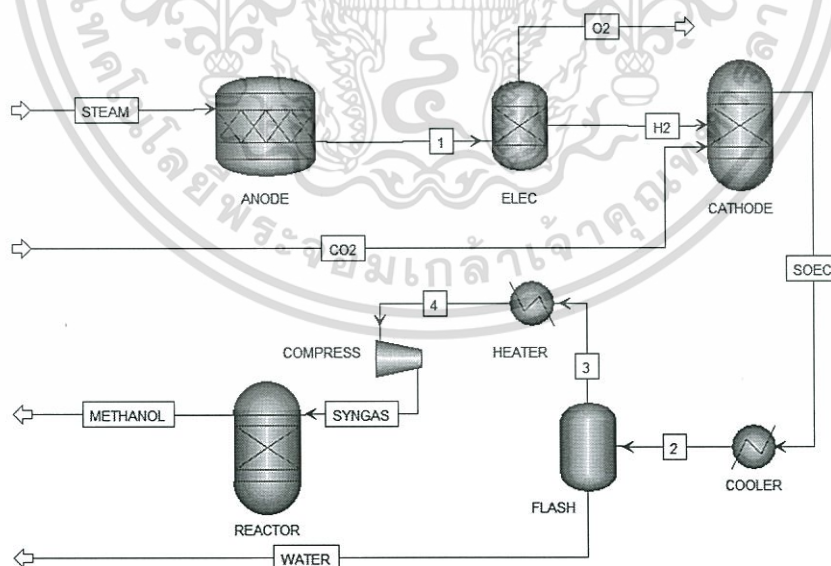
ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของแก๊สสังเคราะห์ที่ออกมาจากถังแฟลชให้เหมาะสมกับการใช้แก๊สสังเคราะห์ผลิตมีเทน เนื่องจากแก๊สสังเคราะห์ออกมาจากถังแฟลชมีอุณหภูมิต่ำประมาณ 35 ถึง 100 องศาเซลเซียส แต่ในการผลิตมีเทนจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 250 ถึง 400 องศาเซลเซียส จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการเพิ่มอุณหภูมิก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตมีเทน

### 4) เครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทน

กระบวนการผลิตมีเทนประกอบไปด้วย 2 ปฏิกริยาหลัก ได้แก่ ปฏิกริยาซาบาเทียร์ และปฏิกริยาการเกิดมีเทน ตามสมการที่ (2.27) และ (2.28) ตามลำดับ ในการจำลองกระบวนการจะเลือกใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิด RGibbs ซึ่งทำงานโดยการคำนวณหาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่สถานะสมดุลจากวิธีการพลังงานอิสระของกิบส์ที่น้อยที่สุด (Minimum Gibbs free energy)

## 3.3 การจำลองกระบวนการผลิตเมทานอล

โดยรูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตมีเทนจากแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน โดยรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบในแผนภาพแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.4 แผนภาพกระบวนการผลิตเมทานอลจากแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

### 1) อุปกรณ์ลดอุณหภูมิ

ใช้ในการลดอุณหภูมิของแก๊สสังเคราะห์ผสมที่ออกมาจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน เช่นเดียวกับกระบวนการผลิตมีเทน

### 2) ถังแฟลช

เพื่อแยกน้ำออกจากแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนก่อนนำไปผลิตเป็นเมทานอล จะแยกโดยใช้ถังแฟลชซึ่งอาศัยความแตกต่างของสถานะของสาร ซึ่งจะต้องลดอุณหภูมิลงให้น้ำอยู่ในสถานะของเหลวส่วนแก๊สสังเคราะห์อยู่ในสถานะแก๊ส แล้วแยกน้ำออกไปด้วยสายการไหล WATER ส่วนแก๊สสังเคราะห์ที่ได้นั้นจะถูกส่งต่อไปยังอุปกรณ์เพิ่มอุณหภูมิด้วยสายการไหลที่ 3

### 3) อุปกรณ์เพิ่มอุณหภูมิ

ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของแก๊สสังเคราะห์ที่ออกมาจากถังแฟลชให้เหมาะสมกับการใช้แก๊สสังเคราะห์ผลิตเมทานอล เนื่องจากแก๊สสังเคราะห์ออกมาจากถังแฟลชมีอุณหภูมิต่ำประมาณ 35 ถึง 100 องศาเซลเซียส แต่ในการผลิตเมทานอลจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 250 ถึง 280 องศาเซลเซียส จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับสายการไหลที่ 3 ก่อนเข้าสู่กระบวนการ

### 4) เครื่องคอมเพรสเซอร์

ใช้ในการเพิ่มความดันให้กับแก๊สสังเคราะห์ก่อนทำปฏิกิริยา เนื่องจากในกระบวนการผลิตเมทานอลจะทำได้ดีในช่วงความดันสูงประมาณ 60 ถึง 80 บรรยากาศ จึงจำเป็นต้องทำการเพิ่มความดันให้กับสายการไหล SYNGAS ก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์

### 5) เครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอล

กระบวนการผลิตมีเทนประกอบไปด้วย 2 ปฏิกิริยาหลัก ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ตามสมการที่ (2.29) และ (2.30) ในการจำลองกระบวนการจะเลือกใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิด RGibbs เช่นเดียวกับกระบวนการผลิตมีเทน

### 3.4 การศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ

การศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ความดันดำเนินงานของถังแฟลช อุณหภูมิดำเนินงานและความดันดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทน โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 1) อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์

มี 6 กรณี คือ 0.5 1 2 3 4 และ 5 โดยเปลี่ยนทั้งอัตราการไหลของไอน้ำและอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์แบบเป็นกรณีศึกษาทั้งหมด ดังนี้

- อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 ประกอบด้วย อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.95 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไอน้ำ 0.475 กิโลโมลต่อชั่วโมง
- อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 ประกอบด้วย อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 1.9 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไอน้ำ 0.95 กิโลโมลต่อชั่วโมง
- อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 1 ประกอบด้วย อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.95 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไอน้ำ 0.95 กิโลโมลต่อชั่วโมง
- อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 2 ประกอบด้วย อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.95 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไอน้ำ 1.9 กิโลโมลต่อชั่วโมง
- อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 2 ประกอบด้วย อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.475 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไอน้ำ 0.95 กิโลโมลต่อชั่วโมง
- อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 3 ประกอบด้วย อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.95 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไอน้ำ 2.85 กิโลโมลต่อชั่วโมง
- อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 3 ประกอบด้วย อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.32 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไอน้ำ 0.95 กิโลโมลต่อชั่วโมง
- อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 4 ประกอบด้วย อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.95 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไอน้ำ 3.8 กิโลโมลต่อชั่วโมง
- อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 4 ประกอบด้วย อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.24 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไอน้ำ 0.95 กิโลโมลต่อชั่วโมง
- อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 5 ประกอบด้วย อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.95 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไอน้ำ 4.75 กิโลโมลต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 5 ประกอบด้วย อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.19 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไอน้ำ 0.95 กิโลโมลต่อชั่วโมง

## 2) อุณหภูมิดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

อุณหภูมิดำเนินงานที่ศึกษามี 3 อุณหภูมิ ได้แก่ 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิในที่นี้หมายความรวมถึงอุณหภูมิของทั้งเซลล์ ดังนั้น ในการจำลองจึงต้องกำหนดอุณหภูมิดำเนินงานทั้งอุณหภูมิของสายการไหล STEAM สายการไหล CO<sub>2</sub> ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

## 3) ความดันดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

ความดันดำเนินงานที่ศึกษามี 3 ความดันดำเนินงาน ได้แก่ 1 5 และ 10 บรรยากาศ ซึ่งความดันดำเนินงานในที่นี้หมายความรวมถึงความดันของทั้งเซลล์ ดังนั้น ในการจำลองจึงต้องกำหนดความดันดำเนินงานทั้งในสายการไหล STEAM สายการไหล CO<sub>2</sub> ความดันที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

## 4) อุณหภูมิดำเนินงานของถังแฟลช

อุณหภูมิดำเนินงานที่ศึกษาอยู่ในช่วง 40 ถึง 100 องศาเซลเซียส ดังนั้น ในการจำลองกระบวนการจึงจำเป็นต้องทำการเปลี่ยนอุณหภูมิในอุปกรณ์ลดอุณหภูมิ (COOLER) และถังแฟลช (FLASH) ในช่วงที่ทำการศึกษาลักษณะ

## 5) ความดันดำเนินงานของถังแฟลช

ความดันดำเนินงานที่ศึกษาอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 บรรยากาศ ดังนั้น ในการจำลองกระบวนการจึงต้องทำการเปลี่ยนความดันในอุปกรณ์ลดอุณหภูมิ (COOLER) และถังแฟลช (FLASH) ในช่วงที่ทำการศึกษาลักษณะ

## 6) อุณหภูมิดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทน

อุณหภูมิดำเนินงานที่ศึกษาอยู่ในช่วง 250 ถึง 400 องศาเซลเซียส ดังนั้น ในการจำลองกระบวนการจึงต้องทำการเปลี่ยนอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทน (REACTOR) ในช่วงที่ทำการศึกษาลักษณะ

## 7) ความดันดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทน

ความดันดำเนินงานที่ศึกษาอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 บรรยากาศ ดังนั้น ในการจำลองกระบวนการจึงต้องทำการเปลี่ยนความดันในเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทน (REACTOR) ในช่วงที่ทำการศึกษาลักษณะเช่นเดียวกับอุณหภูมิดำเนินงาน

#### 8) อุณหภูมิดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอล

อุณหภูมิดำเนินงานที่ศึกษาอยู่ในช่วง 250 ถึง 280 องศาเซลเซียส ดังนั้น ในการจำลองกระบวนการจึงต้องทำการเปลี่ยนอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอล (REACTOR) ในช่วงที่ทำการศึกษาผลกระทบ

#### 9) ความดันดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอล

ความดันดำเนินงานที่ศึกษาอยู่ในช่วง 60 ถึง 80 บรรยากาศ ดังนั้น ในการจำลองกระบวนการจึงต้องทำการเปลี่ยนความดันในเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอล (REACTOR) ในช่วงที่ทำการศึกษาผลกระทบเช่นเดียวกับอุณหภูมิดำเนินงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

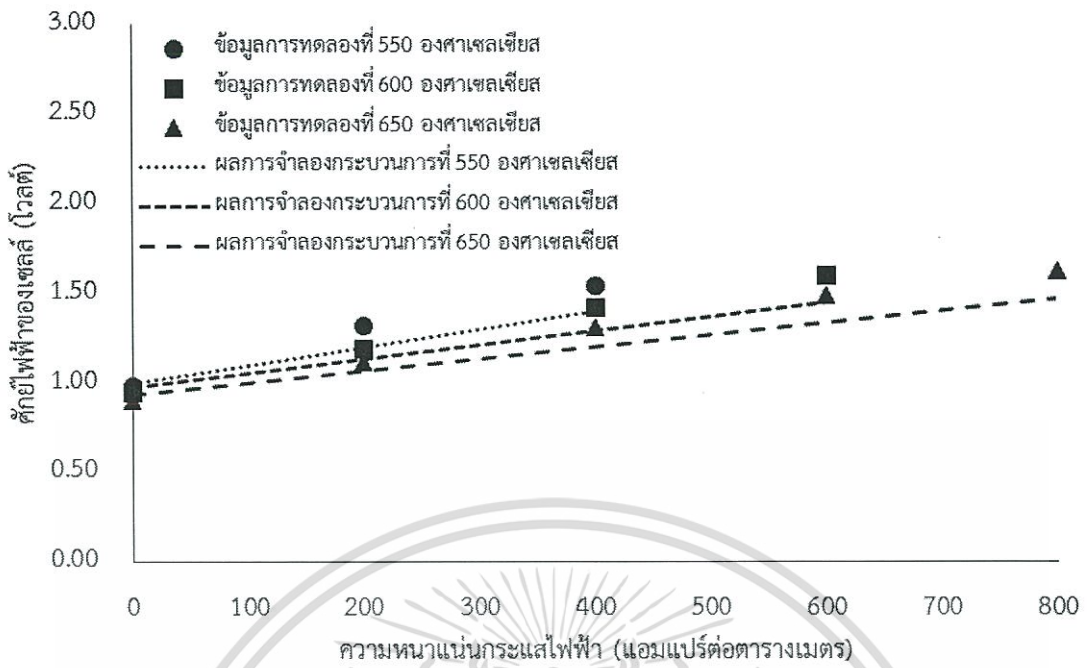
## บทที่ 4

### ผลและอภิปรายผลการจำลองกระบวนการ

ผลการจำลองกระบวนการถูกแบ่งเป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์กับข้อมูลการทดลองแสดงในหัวข้อ 4.1 ผลของสภาวะดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ซึ่งประกอบไปด้วยผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และความดันดำเนินงานแสดงในหัวข้อ 4.2 ผลของอุณหภูมิและความดันดำเนินงานของถังฟลายแสดงในหัวข้อ 4.3 ผลของสภาวะดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทนซึ่งประกอบไปด้วยผลของอุณหภูมิดำเนินงาน และความดันดำเนินงานแสดงในหัวข้อ 4.4 ผลของสภาวะดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอลซึ่งประกอบไปด้วยผลของอุณหภูมิดำเนินงาน และความดันดำเนินงานแสดงในหัวข้อ 4.5 และผลการเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์แสดงในหัวข้อ 4.6

#### 4.1 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์กับข้อมูลการทดลอง

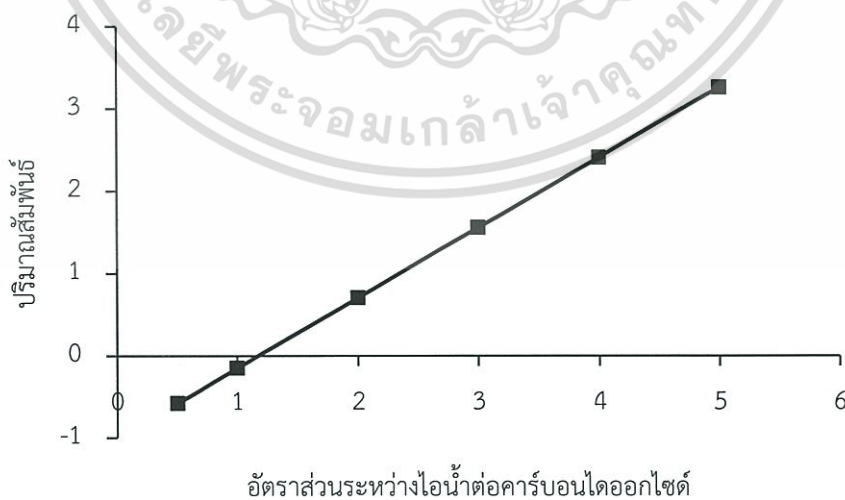
รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ระหว่างผลที่ได้จากการจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์กับผลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยของ Ruiz-Trejo และ Irvine [22] ซึ่งในการทดลองนี้มีจำนวน 500 เซลล์ พื้นที่ผิวของเซลล์ 0.04 ตารางเมตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็น Pt หนา 100 ไมโครเมตร ซึ่งมีรัศมีรูพรุนเฉลี่ย 0.5 ไมโครเมตร ความพรุน 0.3 และใช้ BCZYB เป็นอิเล็กโทรไลต์หนา 200 ไมโครเมตร ไอน้ำที่ป้อนเข้าที่ขั้วแอโนดจะประกอบไปด้วยไอน้ำ 95 เปอร์เซ็นต์โดยโมลและไฮโดรเจนอีก 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่อุณหภูมิดำเนินงาน 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส ความดันดำเนินงาน 1 บรรยากาศ จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าผลการจำลองกระบวนการแสดงผลสอดคล้องกันกับข้อมูลการทดลองของ Ruiz-Trejo และ Irvine [22] ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะพบว่ามีเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่นำมาใช้สามารถทำนายค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้



รูปที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน สำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์กับข้อมูลการทดลอง

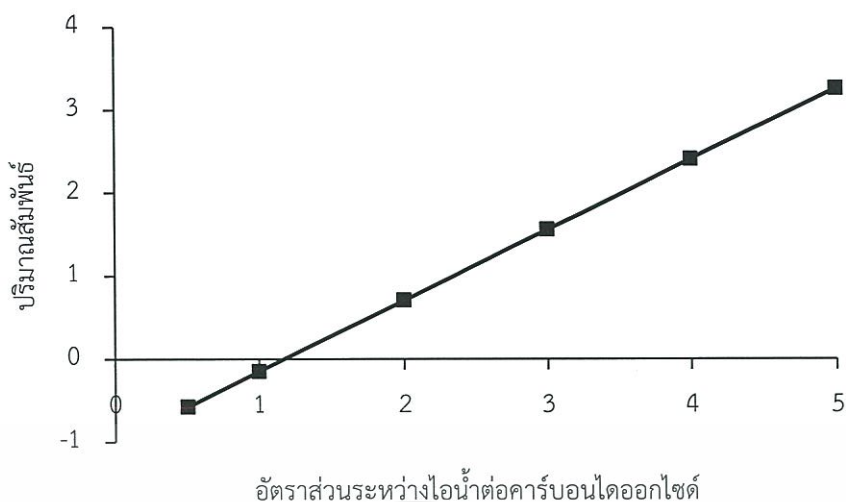
#### 4.2 ผลของสภาวะดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

##### 4.2.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์



ก

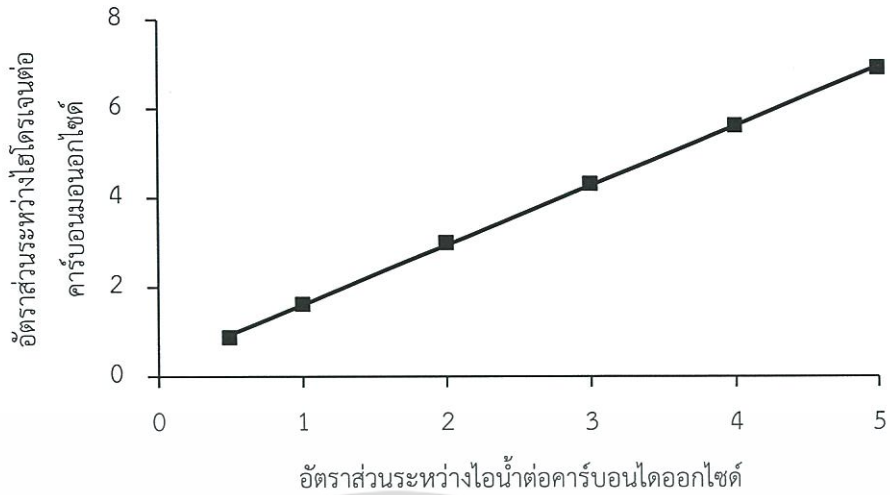
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



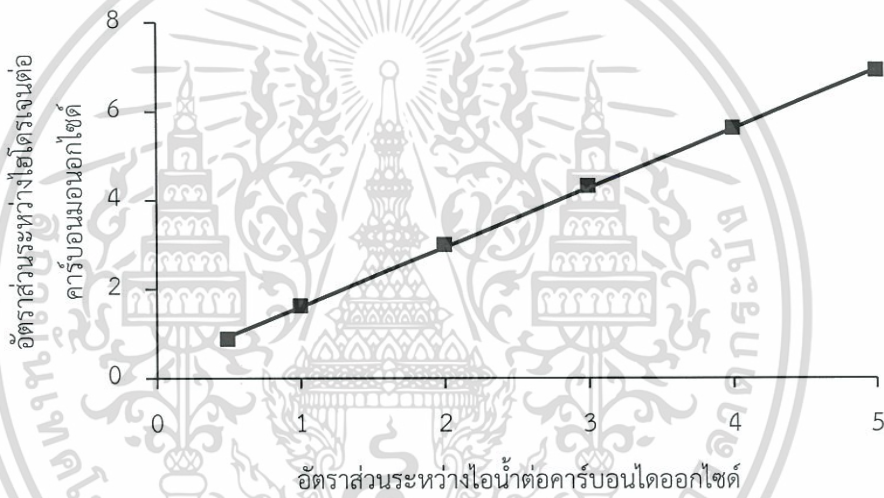
ข

รูปที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อปริมาณสัมพันธ์ ก) เปลี่ยนอัตราการไหลของไอน้ำ ข) เปลี่ยนอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนดำเนินงานที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสและความดัน 1 บรรยากาศ

รูปที่ 4.2 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อปริมาณสัมพันธ์โดยในการจำลองกระบวนการจะกำหนดให้เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนดำเนินงานที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ในขณะที่อัตราการไหลของไอน้ำและอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกปรับเปลี่ยนเพื่อให้ได้อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ตามที่ต้องการ จากรูปที่ 4.2ก และ 4.2ข จะเห็นได้ว่าปริมาณสัมพันธ์ซึ่งคำนวณมาจากสมการ (2.1) มีค่าติดลบเมื่ออัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1 ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณของไอน้ำที่ป้อนเข้าสู่เซลล์อิเล็กโทรไลซิสไม่เพียงพอในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนเพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้มีคาร์บอนไดออกไซด์เหลือไปกับสายผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมาก



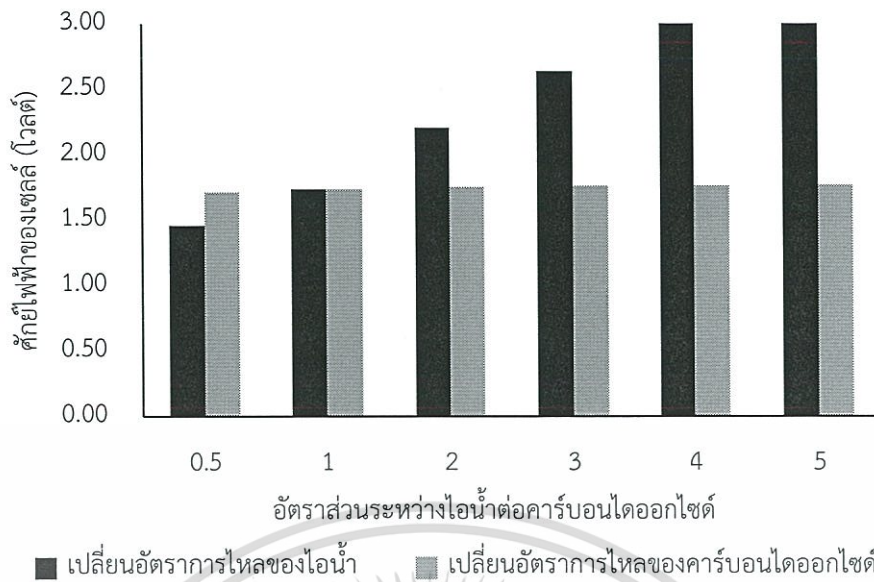
ก



ข

รูปที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่ออัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ก) เปลี่ยนอัตราการไหลของไอน้ำ ข) เปลี่ยนอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนดำเนินงานที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสและความดัน 1 บรรยากาศ

รูปที่ 4.3 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่ออัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยในการจำลองกระบวนการจะกำหนดให้เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนดำเนินงานที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ในขณะที่อัตราการไหลของไอน้ำและอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกปรับเปลี่ยนเพื่อให้ได้อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ตามที่ต้องการ จากรูปที่ 4.3ก และ 4.3ข จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำที่มีต่อคาร์บอนไดออกไซด์ต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่ป้อน ทั้งนี้เนื่องมาจากอัตราการไหลของไอน้ำที่ป้อนจะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการไหลของไฮโดรเจน ในขณะที่อัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์จะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์

จากรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากันทั้งในกรณีที่เปลี่ยนอัตราการไหลของไอน้ำและอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ซึ่งจะทำให้ได้ปริมาณสัมพันธ์ และอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากันด้วย แต่จากการจำลองกระบวนการพบว่าการเปลี่ยนอัตราการไหลของไอน้ำจะส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 กล่าวคือ เมื่ออัตราการไหลของไอน้ำเพิ่มขึ้น ศักย์ไฟฟ้าก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอัตราการไหลของไอน้ำส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ (3.1) ดังนั้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เซลล์อิเล็กทรอนิกส์ต้องใช้ไฟฟ้าในการดำเนินงานมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ในการศึกษาส่วนต่อไปจะเลือกปรับอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเปลี่ยนอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์

ดังนั้น จึงพิจารณาการเปลี่ยนอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการนำแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ไปใช้ในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ต่อไป โดยจะพิจารณาจากค่าปริมาณสัมพันธ์หรืออัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหมาะสม ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจากการจำลองกระบวนการที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณสัมพันธ์ แสดงดังสมการที่ (4.1) และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงดังสมการที่ (4.2)

$$S = 0.85X - 1 \quad (4.1)$$

$$Y = 1.32X + 0.3 \quad (4.2)$$

เมื่อ S = ค่าปริมาณสัมพันธ์  
 X = อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์  
 Y = อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

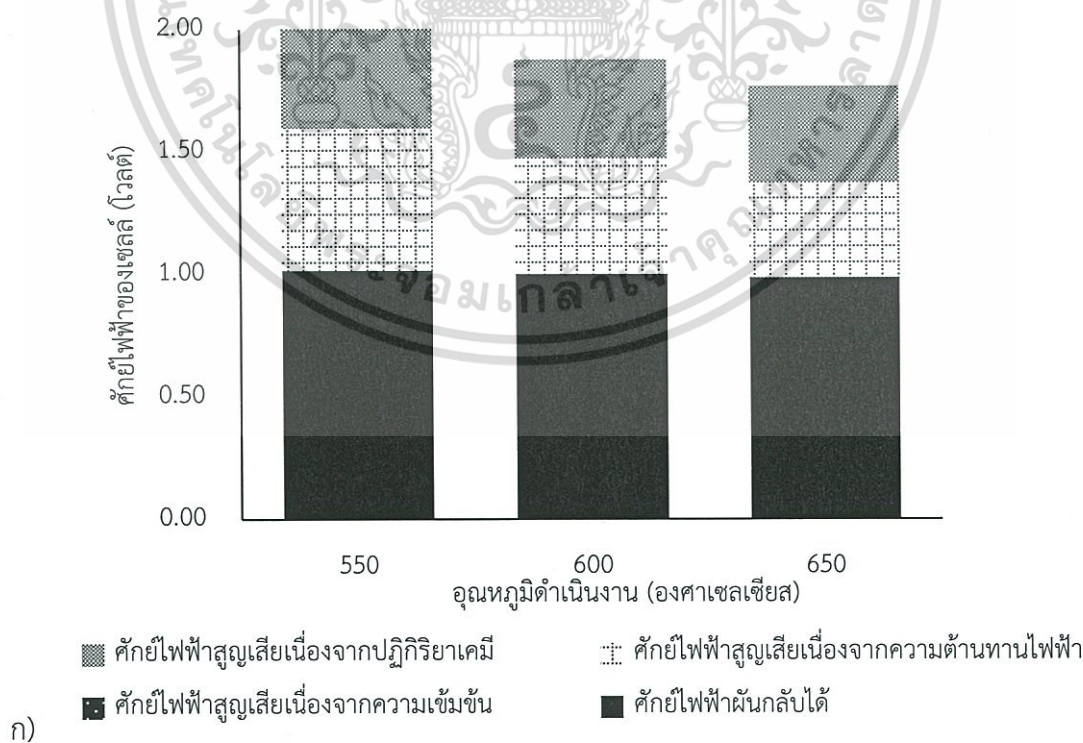
ทั้งนี้สมการที่ (4.1) และ (4.2) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อเซลล์อิเล็กโทรไลซิสดำเนินการที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ อย่างไรก็ตามเนื่องจากในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการนำแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ไปใช้ในการผลิตเป็นมีเทนและเมทานอลต่อ ดังนั้น ในการจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบน้ำโปรตอนในส่วนต่อไปของงานวิจัยนี้ปริมาณสัมพันธ์จะต้องมีค่าเท่ากับ 3 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับการนำแก๊สสังเคราะห์ไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ต่างๆ และอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม

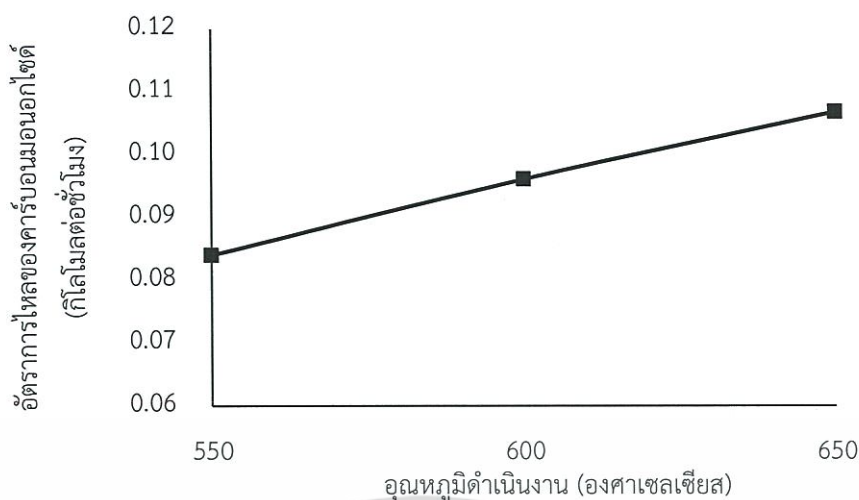
เชื้อเพลิงสังเคราะห์	อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์
มีเทน	4.69
เมทานอล	3.52
ไดเมทิลอีเทอร์	0.53
เชื้อเพลิงเหลว	1.29

#### 4.2.2 ผลของอุณหภูมิดำเนินงาน

รูปที่ 4.5 แสดงผลการจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่อุณหภูมิ 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส ณ ความดันคงที่ที่ 1 บรรยากาศ และอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 4.69 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการดำเนินงานสูงขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะมีค่าลดลง เนื่องจากการดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงชันมีผลต่อค่าต่างๆ ดังนี้ (1) ค่าศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้จะมีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงชันต้องการใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดในการแยกน้ำน้อยลงตามสมการของ Nernst (2) ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี มีค่าลดลงเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงชันทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงชัน และ (3) ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากการนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์มีค่ามากขึ้น ในทางกลับกันค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นมีค่าน้อยกว่าการลดลงของศักย์ไฟฟ้าสูญเสียจากกรณีอื่นๆ จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะมีค่าต่ำลง เมื่ออุณหภูมิดำเนินงานสูงชัน นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิสูงชันจะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบย้อนกลับซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ได้คาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนควรดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากใช้ศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่า ในขณะเดียวกันก็ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

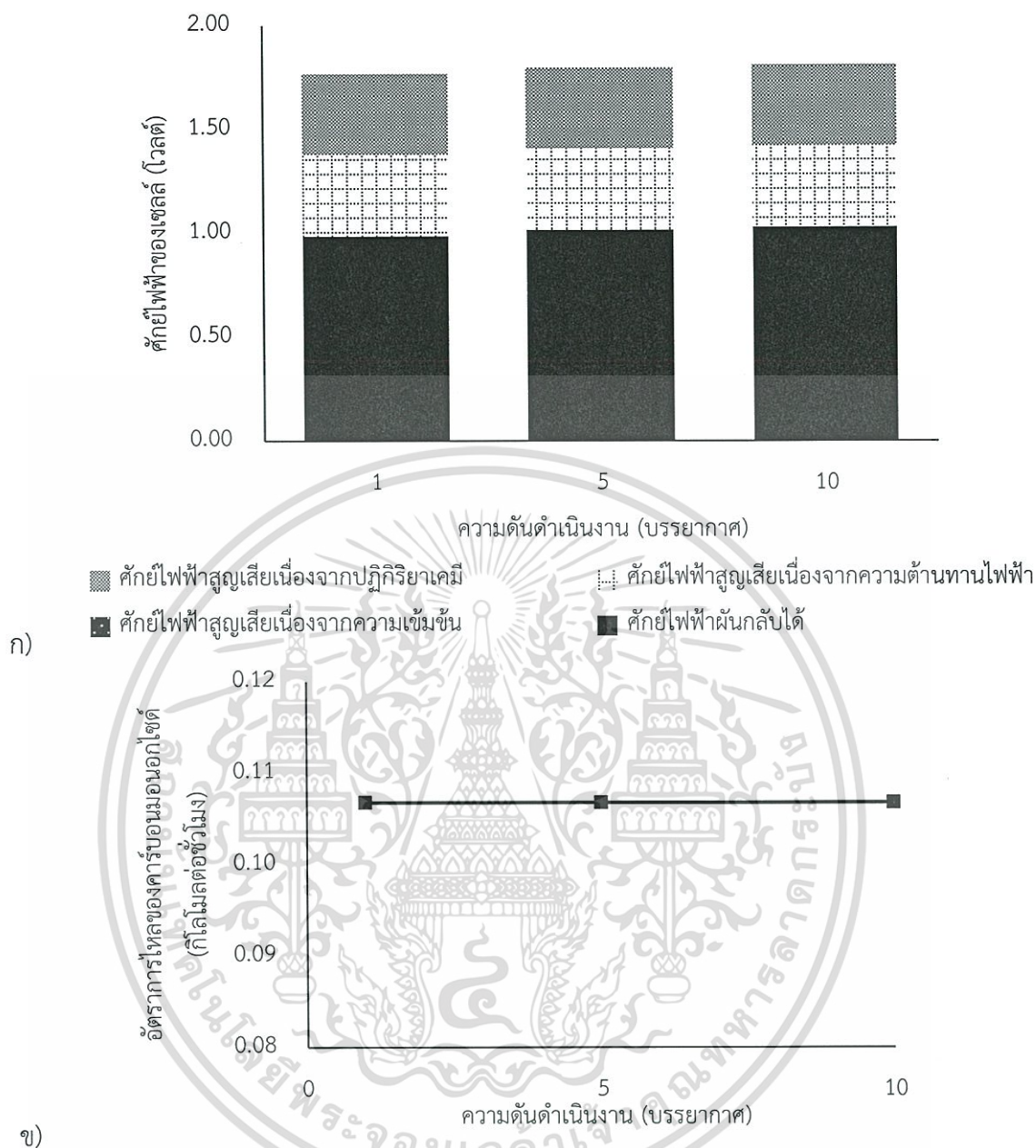


ข)

รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานที่มีต่อ ก) ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ข) อัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์

#### 4.2.3 ผลของความดันดำเนินงาน

ผลของความดันดำเนินงานที่มีต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์แสดงดังรูปที่ 4.6 จากผลการจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ความดันดำเนินงาน 1.5 และ 10 บรรยากาศ อุณหภูมิดำเนินงานคงที่ 650 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 4.69 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความดันส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งโดยปกติแล้วการเพิ่มขึ้นของความดันดำเนินงานจะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นลดลงเนื่องจากทำให้ความดันย่อยของสารแต่ละองค์ประกอบสูงขึ้น แก๊สจึงสามารถแพร่ได้ง่ายขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความดันสูงต้องการใช้ศักย์ไฟฟ้าในการแยกน้ำมากขึ้นตามสมการของ Nernst โดยการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นและศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้มีค่าใกล้เคียงกันจึงไม่ส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ส่วนศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไม่ขึ้นกับความดันดำเนินงาน นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มความดันในการดำเนินงานไม่ส่งผลต่อสมดุลของปฏิกิริยาออกเทอร์แก๊สซิฟแบบย้อนกลับ จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความดันดำเนินงานไม่ส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และอัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 4.6 ผลของความดันดำเนินงานที่มีต่อ ก) ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ข) อัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์

จากผลการจำลองกระบวนการพบว่าภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน คือ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ความดันไม่มีผลต่อศักย์ไฟฟ้าและอัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์ สำหรับการผลิตมีเทนที่ต้องการปริมาณสัมพันธ์เท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม คือ 4.69 และสำหรับการผลิตมีเทนอลที่ต้องการปริมาณสัมพันธ์เท่ากับ 2 อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม คือ 3.52 จะได้แก๊สผลิตภัณฑ์ประกอบไปด้วย ไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 อัตราการไหลเชิงโมลของแต่ละองค์ประกอบในแก๊สผลิตภัณฑ์

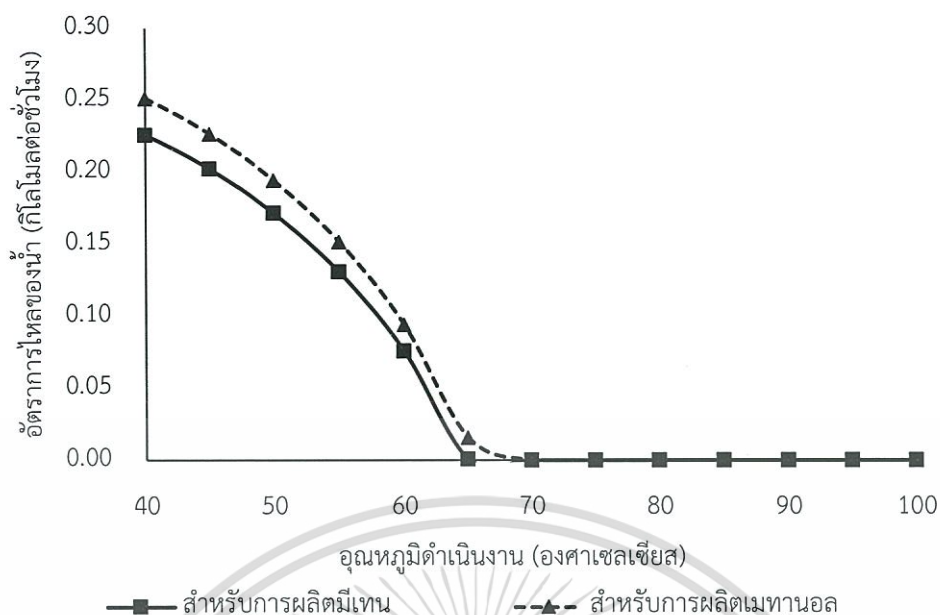
องค์ประกอบ	อัตราการไหลเชิงโมล (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	
	สำหรับการผลิตมีเทน	สำหรับการผลิตเมทานอล
ไฮโดรเจน	0.70	0.67
คาร์บอนมอนอกไซด์	0.11	0.14
คาร์บอนไดออกไซด์	0.09	0.13
น้ำ	0.30	0.33

คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ซึ่งองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันจะแสดงดังตารางที่ 4.2 และจากตารางจะเห็นได้ว่าในแก๊สผลิตภัณฑ์มีน้ำเจือปนอยู่ ดังนั้นจึงควรแยกน้ำออกก่อนที่จะนำไปผลิตมีเทนและเมทานอล

### 4.3 ผลของสภาวะดำเนินงานของถังแฟลช

#### 4.3.1 ผลของอุณหภูมิดำเนินงาน

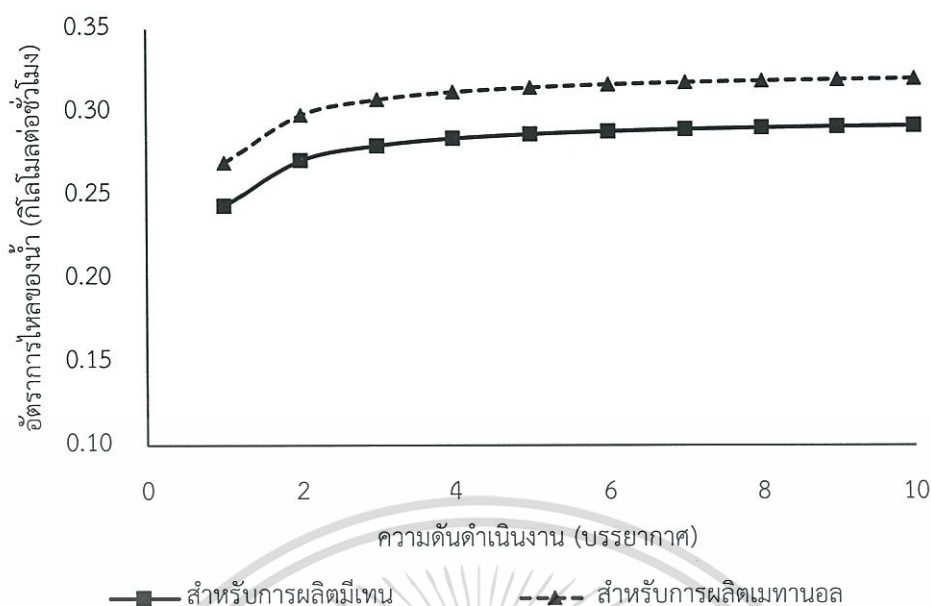
ถังแฟลชถูกนำมาใช้เพื่อแยกน้ำออกจากแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนก่อนนำไปผลิตเป็นมีเทนและเมทานอล ซึ่งถังแฟลชสามารถแยกน้ำออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ได้โดยอาศัยความแตกต่างของสถานะของสาร ดังนั้นจึงต้องลดอุณหภูมิของแก๊สสังเคราะห์ลง เพื่อให้ น้ำอยู่ในสถานะของเหลว ส่วนแก๊สสังเคราะห์อยู่ในสถานะแก๊ส รูปที่ 4.7 แสดงผลของอุณหภูมิดำเนินงานของถังแฟลชที่มีผลต่ออัตราการไหลของน้ำที่ถูกแยกออกจากแก๊สสังเคราะห์ก่อนที่จะนำไปผลิตมีเทนและเมทานอล โดยอุณหภูมิของถังแฟลชจะถูกปรับเปลี่ยนอยู่ในช่วง 40 ถึง 100 องศาเซลเซียส จากการจำลองกระบวนการพบว่า เมื่ออุณหภูมิของเครื่องแฟลชมีค่าต่ำลง ก็จะสามารถแยกน้ำออกจากแก๊สสังเคราะห์ที่ต้องการได้มากขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำน้ำจะอยู่ในสถานะของเหลวได้มากขึ้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกอุณหภูมิในการดำเนินงานของถังแฟลชที่ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานที่มีต่ออัตราการไหลของน้ำที่แยกได้ เมื่อถึงแฟลชดำเนินงานที่ความดัน 1 บรรยากาศ

#### 4.3.2 ผลของความดันดำเนินงาน

ผลของความดันในการดำเนินงานของถังแฟลชที่มีต่ออัตราการไหลของน้ำที่แยกได้ เมื่อถึงแฟลชดำเนินงานที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความดันของถังแฟลชสูงขึ้น น้ำจะถูกแยกออกจากแก๊สสังเคราะห์ที่ต้องการได้มากขึ้น จากผลการจำลองกระบวนการจะเห็นได้ว่าน้ำจะถูกแยกออกจากแก๊สสังเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วในช่วงความดัน 1 ถึง 3 บรรยากาศ โดยที่ความดันสูงกว่า 3 บรรยากาศ น้ำจะถูกแยกได้มากขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้น เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานในการเพิ่มความดัน จึงเลือกความดันของถังแฟลชที่ 3 บรรยากาศ

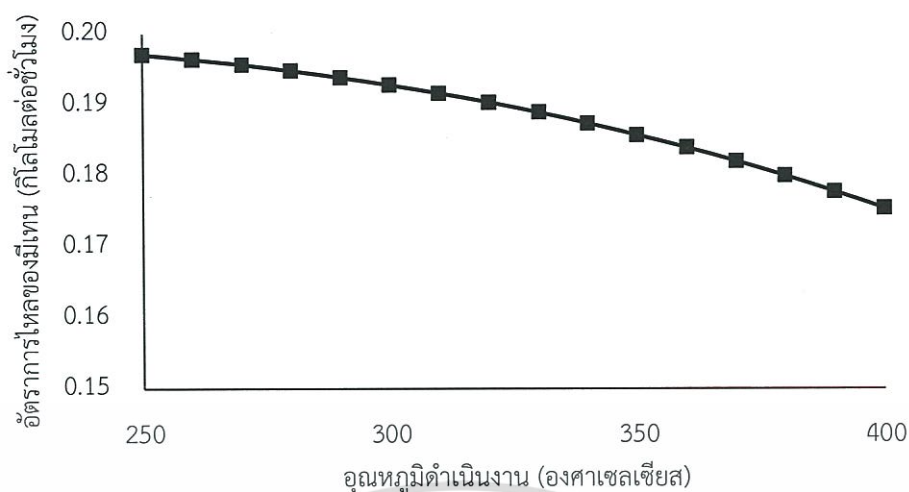


รูปที่ 4.8 ผลของความดันดำเนินงานที่มีต่ออัตราการไหลของน้ำที่แยกได้ เมื่อถึงแฟลชดำเนินงานที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

#### 4.4 ผลของสภาวะดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทน

##### 4.4.1 ผลของอุณหภูมิดำเนินงาน

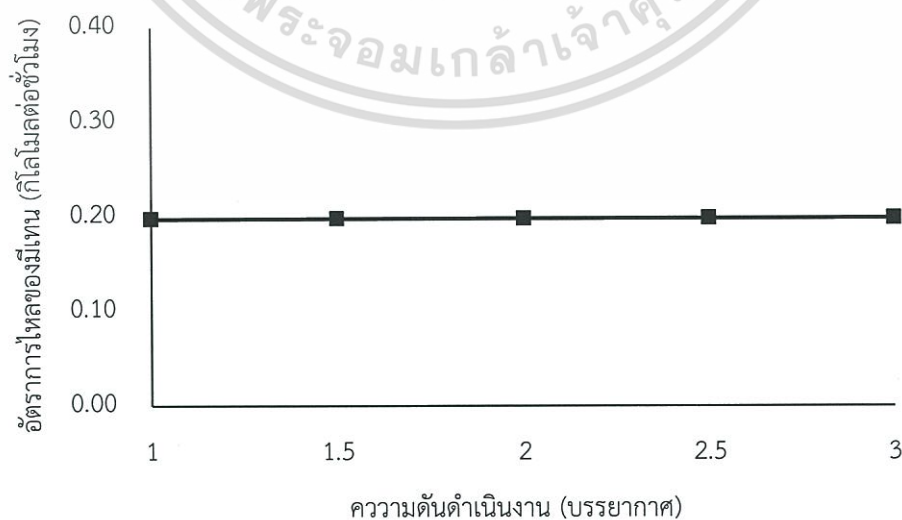
แก๊สสังเคราะห์หลังจากการแยกน้ำด้วยถังแฟลชซึ่งประกอบไปด้วย ไฮโดรเจน 0.70 กิโลโมลต่อชั่วโมง คาร์บอนมอนอกไซด์ 0.11 กิโลโมลต่อชั่วโมง คาร์บอนไดออกไซด์ 0.09 กิโลโมลต่อชั่วโมง และน้ำปนอยู่ 0.02 กิโลโมลต่อชั่วโมง ถูกนำมาใช้ในการผลิตมีเทนต่อ รูปที่ 4.9 แสดงอัตราการไหลของมีเทนที่ผลิตได้ ที่อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทนซึ่งถูกศึกษาในช่วง 250 ถึง 400 องศาเซลเซียส ผลจากการจำลองเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทนแสดงให้เห็นว่า มีเทนจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่ออุณหภูมิต่ำ เนื่องจากทั้งปฏิกิริยาซาบาเทียร์และปฏิกิริยาการเกิดมีเทนเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้สมดุลเลื่อนไปทางสารตั้งต้นมากขึ้น มีเทนจึงถูกผลิตได้น้อยลง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกผลิตมีเทนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เพื่อประหยัดพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิ



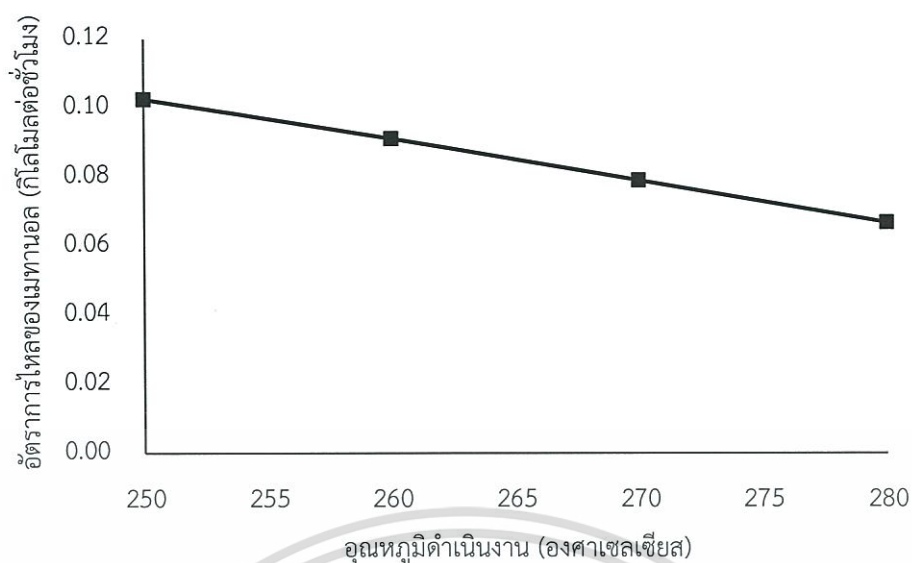
รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานที่มีต่ออัตราการไหลของมีเทน ณ ความดัน 1 บรรยากาศ

#### 4.4.2 ผลของความดันดำเนินงาน

ความดันดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทนถูกศึกษาในช่วง 1 ถึง 3 บรรยากาศ ซึ่งรูปที่ 4.10 แสดงอัตราการไหลของมีเทนที่ผลิตได้ ณ ความดันต่างๆ โดยปกติแล้วการเพิ่มความดันจะช่วยเลื่อนสมดุลของทั้งปฏิกิริยาซาบาเทียร์และปฏิกิริยาการเกิดมีเทนไปทางผลิตภัณฑ์ แต่จากผลการจำลองเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทนดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า การเปลี่ยนแปลงความดันดำเนินงานในเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทนไม่ส่งผลต่ออัตราการไหลของมีเทน เนื่องจากที่อุณหภูมิดำเนินงาน 250 องศาเซลเซียส แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดปฏิกิริยาเป็นมีเทนจนหมดแล้ว การเพิ่มความดันจึงไม่ทำให้อัตราการไหลของมีเทนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะผลิตมีเทนที่ความดัน 3 บรรยากาศ เท่ากับที่ออกจากถังแฟลชเพื่อประหยัดพลังงานในการปรับความดัน



รูปที่ 4.10 ผลของความดันดำเนินงานที่มีต่ออัตราการไหลของมีเทน ณ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

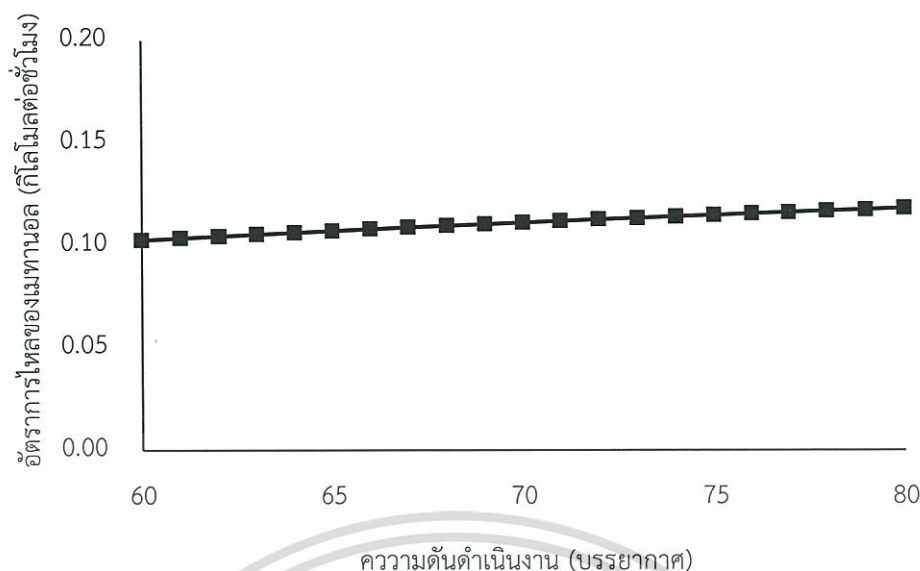


รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานที่มีต่ออัตราการไหลของเมทานอล ณ ความดัน 60 บรรยากาศ

#### 4.5 ผลของสภาวะดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอล

##### 4.5.1 ผลของอุณหภูมิดำเนินงาน

แก๊สสังเคราะห์หลังจากการแยกน้ำด้วยถังแฟลชซึ่งประกอบไปด้วย ไฮโดรเจน 0.67 กิโลโมลต่อชั่วโมง คาร์บอนมอนอกไซด์ 0.14 กิโลโมลต่อชั่วโมง คาร์บอนไดออกไซด์ 0.13 กิโลโมลต่อชั่วโมง และน้ำปนอยู่ 0.02 กิโลโมลต่อชั่วโมง ถูกนำมาใช้ในการผลิตเมทานอลต่อ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอลถูกศึกษาในช่วง 250 ถึง 280 องศาเซลเซียส ผลจากการจำลองเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอลแสดงให้เห็นว่า การผลิตเมทานอลจะทำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำดังแสดงในรูปที่ 4.11 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของทั้งคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้สมดุลเลื่อนไปทางสารตั้งต้นมากขึ้นจึงเกิดเมทานอลได้น้อยลง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกผลิตเมทานอลที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เพื่อประหยัดพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิเช่นเดียวกับการผลิตมีเทน



รูปที่ 4.12 ผลของความดันดำเนินงานที่มีต่ออัตราการไหลของเมทานอล

ณ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

#### 4.5.2 ผลของความดันดำเนินงาน

ความดันดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอลถูกศึกษาในช่วง 60 ถึง 80 บรรยากาศ ซึ่งรูปที่ 4.12 แสดงอัตราการไหลของเมทานอลที่ผลิตได้ ณ ความดันต่างๆ จากผลการจำลองเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอล พบว่าการเพิ่มความดันดำเนินงานในเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอลส่งผลให้อัตราการไหลของเมทานอล เนื่องจากในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของทั้งคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ การเพิ่มความดันจะช่วยเลื่อนสมดุลของทั้งสองปฏิกิริยาไปทางผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะผลิตเมทานอลที่ความดัน 80 บรรยากาศ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มากที่สุด

#### 4.6 ผลการเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์

เมื่อดำเนินงานในสภาวะที่เหมาะสมตามผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ในการผลิตมีเทนและเมทานอลมีองค์ประกอบแสดงดังตารางที่ 4.4 จากตารางแสดงให้เห็นว่าในกระบวนการผลิตเมทานอลผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น 0.03 กิโลโมลต่อชั่วโมง ในขณะที่ในกระบวนการผลิตมีเทนไม่ก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสามารถลดคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศได้อีกด้วย ดังนั้น การนำแก๊สสังเคราะห์มาผลิตเป็นมีเทนอาจอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการนำแก๊สสังเคราะห์มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้

ตารางที่ 4.3 สภาวะดำเนินงานที่เหมาะสมสำหรับการผลิตมีเทนและเมทานอล

เชื้อเพลิงสังเคราะห์		เซลล์อิเล็กโทรไลซิส ชนิดออกไซด์แข็งแบบ นำโปรตอน	ถังแพลช	เครื่องปฏิกรณ์
มีเทน	อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อ คาร์บอนไดออกไซด์	4.69	-	-
	อุณหภูมิดำเนินงาน (องศาเซลเซียส)	650	40	250
	ความดันดำเนินงาน (บรรยากาศ)	3	3	3
เมทานอล	อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อ คาร์บอนไดออกไซด์	3.52	-	-
	อุณหภูมิดำเนินงาน (องศาเซลเซียส)	650	40	250
	ความดันดำเนินงาน (บรรยากาศ)	3	3	80

ตารางที่ 4.4 อัตราการไหลของแต่ละองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์

เชื้อเพลิงสังเคราะห์	องค์ประกอบ	อัตราการไหล (กิโลโมลต่อชั่วโมง)
มีเทน	ไฮโดรเจน	0.01
	น้ำ	0.28
	คาร์บอนไดออกไซด์	-
	คาร์บอนมอนอกไซด์	-
	มีเทน	0.20
เมทานอล	ไฮโดรเจน	0.38
	น้ำ	0.01
	คาร์บอนไดออกไซด์	0.03
	คาร์บอนมอนอกไซด์	0.10
	มีเทน	0.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและการผลิตมีเทนและเมทานอล โดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Aspen Plus™ เพื่อหาสภาวะดำเนินงานที่เหมาะสมทั้งในส่วนของการผลิตแก๊สสังเคราะห์ แก๊สมีเทน และเมทานอล

เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่น่าเสนอ จึงทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับข้อมูลการทดลองของนักวิจัยท่านอื่น พบว่าความคลื่อนระหว่างผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการและผลการทดลองมีค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงสามารถนำมาใช้ในการศึกษาต่อได้

จากนั้นทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับการนำแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ชนิดต่างๆ ผลการจำลองกระบวนการบ่งชี้ว่า ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ เพื่อให้ได้ปริมาณสัมพันธ์ที่เหมาะสมในการผลิตมีเทน เมทานอล ไดเมทิลอีเทอร์ และเชื้อเพลิงเหลว จะต้องใช้อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ เป็น 4.69 3.52 0.53 และ 1.29 ตามลำดับ จากนั้นจะทำการศึกษาผลของอุณหภูมิดำเนินงานและความดันดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ซึ่งพบว่าเซลล์ดังกล่าวควรดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง โดยค่าที่เหมาะสมที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าน้อยที่สุดและผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้มากที่สุด คือที่ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และความดันไม่มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ โดยภายใต้ภาวะการดำเนินงานดังกล่าว จะได้แก๊สสังเคราะห์ประกอบไปด้วย ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ซึ่งแก๊สสังเคราะห์นี้เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการนำไปผลิตเป็นมีเทนและเมทานอล

เนื่องจากแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนยังมีน้ำเจือปนอยู่ปริมาณมาก จึงต้องแยกน้ำออกจากแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ถังแฟลช จากการศึกษาอุณหภูมิและความดันของถังแฟลชพบว่าค่าที่เหมาะสมที่ทำให้น้ำแยกออกจากแก๊สสังเคราะห์ได้มากที่สุด คือที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 3 บรรยากาศ ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีสารต่างๆ ดังนี้ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์

เมื่อนำแก๊สสังเคราะห์ที่ผ่านการแยกน้ำป้อนเข้าสู่เครื่องเครื่องปฏิกรณ์ผลิตมีเทน พบว่า ภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสม คือ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดัน 3 บรรยากาศ โดยจะได้ อัตราการไหลของมีเทนอยู่ที่ 0.2 กิโลโมลต่อชั่วโมงและไม่เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และเมื่อนำ แก๊สสังเคราะห์ที่ผ่านการแยกน้ำป้อนเข้าสู่เครื่องเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเมทานอล พบว่า ภาวะการ ดำเนินงานที่เหมาะสม คือ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดัน 80 บรรยากาศ โดยจะได้ อัตรา การไหลของเมทานอลอยู่ที่ 0.12 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 0.03 กิโลโมลต่อชั่วโมง ดังนั้น การนำแก๊สสังเคราะห์มาผลิตเป็นมีเทนอาจอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการ นำแก๊สสังเคราะห์มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมาก ขึ้นในบรรยากาศ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาสภาวะดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำ โพรตอนพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้เป็นขอบเขตของสภาวะดำเนินงานที่ใช้เปรียบเทียบกับ ข้อมูลการทดลอง ดังนั้น จึงควรทำการศึกษาในขอบเขตที่กว้างมากขึ้น



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Biofuel.org.uk. “What is Syngas”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://biofuel.org.uk/what-is-syngas.html>. (สืบค้นข้อมูล 10 ตุลาคม 2560)
- [2] Stambouli A., Traversa E. “Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 6, 2002. pp. 433-455.
- [3] Zhang X., Song Y., Wang G., Bao X. “Co-electrolysis of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in high-temperature solid oxide electrolysis cells: Recent advance in cathodes.” *Journal of Energy Chemistry*. Vol. 26, 2017. pp. 839-856.
- [4] Patcharavorachot Y., Brandon N.P., Paengjuntuek W., Assabumrungrat S., Arpornwichanop A. “Analysis of planar solid oxide fuel cells based on proton-conducting electrolyte.” *Solid State Ionics*. Vol. 181, 2010. pp. 1568-1576.
- [5] Li H., Chen X., Chen S., Wu Y., Xie K. “Composite manganate oxygen electrode enhanced with iron oxide nanocatalyst for high temperature steam electrolysis in a proton-conducting solid oxide electrolyzer.” *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 40, 2015. pp. 7920-7931.
- [6] Schwede S., Gerber M. “Biological Syngas Methanation via Immobilized Methanogenic Archaea on Biochar.” *Energy Procedia*. Vol. 105, 2017. pp. 823-829.
- [7] Stempien J., Ni M., Sun Q., Chan S. “Production of sustainable methane from renewable energy and captured carbon dioxide with the use of Solid Oxide Electrolyzer: A Thermodynamic assessment.” *Energy*. Vol. 82, 2015. pp. 714-721.
- [8] Maria R.D., Diaz I., Rodriguez M., Saiz A. “Industrial Methanol from Syngas: Kinetic Study and Process Simulation.” *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. Vol. 11 (1), 2013. pp.469-477.
- [9] Ali K.A., Mohamed A.R. “Recent development in catalytic technologies for methanol synthesis from renewable sources: A critical review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 44, 2015, pp. 508-518.
- [10] Ganesh I. “Conversion of carbon dioxide into methanol – a potential liquid fuel: Fundamental challenges and opportunities (a review).” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 31, 2014, pp. 221-257.

- [11] Haar L.W., Vogel J.E., "in: Proceedings of the Sixth World Petroleum Congress." Frankfurt am Main, Germany, 1963.
- [12] Centi G., Perathoner S. "Opportunities and prospects in the chemical recycling of carbon dioxide to fuels." *Catalysis Today*. Vol. 148, 2009. pp. 191-205.
- [13] Steynberg A.P., Dry M. "Chapter 4 - Synthesis gas production for FT synthesis." *Studies in Surface Science and Catalysis*. Elsevier, 2004. pp. 258-405
- [14] Olah G.A., et al. "Conversion of Carbon Dioxide to Methanol and/or Dimethyl Ether Using Bi-Reforming of Methane or Natural Gas." U.S. Patent no. 7906559 B2, 2011.
- [15] Hankin A., Shah N. "Process exploration and assessment for the production of methanol and dimethyl ether from carbon dioxide and water." *Sustainable Energy Fuels*. Vol. 1, 2017. pp. 1541-1556.
- [16] Sudiro M., Bertucco A. "Production of synthetic gasoline and diesel fuel by alternative processes using natural gas and coal: Process simulation and optimization." *Energy*. Vol. 34, 2009. pp. 2206-2214.
- [17] Jensen S., Sun X., Ebbesen S.D., Knibbe R., Mogensen M. "Hydrogen and synthetic fuel production using pressurized solid oxide electrolysis cells." *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 35, 2010. pp. 9544-9549.
- [18] Namwong L., Authayanun S., Seabea D., Patcharavorachot Y., Arpornwichanop A. "Modeling and optimization of proton-conducting solid oxide electrolysis cell: Conversion of CO<sub>2</sub> into value-added products." *Journal of Power Sources*. Vol. 3331, 2016. pp. 515-526.
- [19] Junaedi C., Hawley K., Walsh D., Roychoudhury S. "Compact and Lightweight Sabatier Reactor for Carbon Dioxide Reduction." *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2012.
- [20] Mayra O., Leiviska K. "Modelling in methanol synthesis." *Control Engineering Laboratory*, University of Oulu, 2008.
- [21] Jensen S., Sun X., Ebbesen S.D., Knibbe R., Mogensen M. "Hydrogen and synthetic fuel production using pressurized solid oxide electrolysis cells." *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 35, 2010, pp. 9544-9549.

- [22] Ruiz-Trejo E., Irvine J.T.S. "Ceramic Proton Conducting Membranes for the Electrochemical Production of Syngas." *Solid State Ionics*. Vol. 216, 2012. pp. 36-40.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาษา FORTAN สำหรับการคำนวณในกล่องการคำนวณของโปรแกรม Aspen Plus™

c Constants

$$F = 96485.3365$$

$$PI = 3.1415927$$

$$R1 = 8.3144621$$

$$R2 = 0.00008205736$$

c Operating parameters

$$TK = T+273.15$$

$$LA = 0.0001$$

$$LE = 0.0002$$

$$LC = 0.0001$$

c For validation

$$c \quad I = 200$$

$$c \quad CONV = (3.6*AREA*NCELL)/(2*WIN*F)$$

c For simulation

$$CONV = 0.8$$

$$I = (2*WIN*CONV*F)/(3.6*AREA*NCELL)$$

c Material properties

$$RP = 0.0000005$$

$$PORSITY = 0.3$$

$$FEFF = PORSITY/((3-PORSITY)/2)**0.5$$

$$COND = (31400*EXP(-3862/TK))/TK$$

c Knudsen diffusion coefficients

$$DWK = (2*RP/3)*((8*R1*TK)/(PI*18))**0.5$$

$$DHK = (2*RP/3)*((8*R1*TK)/(PI*2))**0.5$$

$$DOK = (2*RP/3)*((8*R1*TK)/(PI*32))**0.5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

c Water-oxygen binary diffusion coefficient

$$LWO = 3.0540$$

$$EKWO = 293.8213$$

$$MWWO = 23.04$$

$$TSWO = TK/EKWO$$

$$OHWO = (1.06036*(TSWO**(-0.1561)))$$

$$OHWO = OHWO+(0.193/EXP(0.47635*TSWO))$$

$$OHWO = OHWO+(1.03587/EXP(1.52996*TSWO))$$

$$OHWO = OHWO+(1.76474/EXP(3.89411*TSWO))$$

$$DWO=0.000000266*(TK**1.5)/(P*(MWWO**0.5)*(LWO**2)*OHWO)$$

c Diffusion coefficients

$$DW = FEFF*DWK*DWO/(DWK+DWO)$$

$$DH = FEFF*DHK$$

$$DO = FEFF*DOK*DWO/(DOK+DWO)$$

c Pressure

$$PW = XW*P$$

$$PH = XH*P$$

$$PO = XO*P$$

$$PWTPB = PW-((I*R2*TK*LA)/(2*F*DW))$$

$$PHTPB = P-(P-PH)*EXP((-I*R2*TK*LC)/(2*F*P*DH))$$

$$POTPB = PO+((I*R2*TK*LA)/(4*F*DO))$$

c Reversible potential

$$E = (1.253-0.00024516*TK)+(R1*TK/(2*F))*LOG(PH*PO**0.5/PW)$$

c Concentration overpotentials

$$ECONA = (R1*TK/(2*F))*LOG((POTPB/PO)**0.5/(PWTPB/PW))$$

$$ECONC = (R1*TK/(2*F))*LOG(PHTPB/PH)$$

$$ECON = ECONA+ECONC$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## c Activation overpotentials

$$I_{0A} = 12.0751 * TK * EXP(-6389.2147 / TK)$$

$$I_{0C} = 36.9213 * TK * EXP(-6824.1337 / TK)$$

$$E_{ACTA} = (R1 * TK / (2 * F)) * LOG(I / (2 * I_{0A}) + ((I / (2 * I_{0A}))^{**2} + 1)^{**0.5})$$

$$E_{ACTC} = (R1 * TK / (2 * F)) * LOG(I / (2 * I_{0C}) + ((I / (2 * I_{0C}))^{**2} + 1)^{**0.5})$$

$$E_{ACT} = E_{ACTA} + E_{ACTC}$$

## c Ohmic overpotential

$$E_{OHM} = I * LE / COND$$

## c Cell potential

$$V = E + E_{CON} + E_{ACT} + E_{OHM}$$

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน สำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์กับข้อมูลการทดลอง

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อ ตารางเมตร)	ศักย์ไฟฟ้าของ เซลล์จากการ ทดลอง (โวลต์)	ศักย์ไฟฟ้าของ เซลล์จากการ จำลอง กระบวนการ (โวลต์)	ความคลาด เคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)
550	0	0.9829	0.9861	0.3234
	200	1.3229	1.2086	8.6382
	400	1.5829	1.3920	9.9585
600	0	0.9464	0.9676	2.2413
	200	1.1944	1.1361	4.8790
	400	1.4184	1.3022	8.1945
	600	1.6184	1.4397	9.9640
650	0	0.8997	0.9490	5.4746
	200	1.1117	1.0281	7.5174
	400	1.3077	1.2237	6.4210
	600	1.4877	1.3483	9.3693
	800	1.6305	1.4601	9.9845

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาณสัมพัทธ์

อัตราส่วนระหว่าง ไอน้ำต่อ คาร์บอนไดออกไซด์	ปริมาณสัมพัทธ์		อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อ คาร์บอนมอนอกไซด์	
	เปลี่ยนอัตรา การไหลของ ไอน้ำ	เปลี่ยนอัตราการ ไหลของ คาร์บอนไดออกไซด์	เปลี่ยนอัตรา การไหลของ ไอน้ำ	เปลี่ยนอัตราการ ไหลของ คาร์บอนไดออกไซด์
0.5	-0.5737	-0.5737	0.8759	0.8759
1	-0.1474	-0.1474	1.6146	1.6146
2	0.7053	0.7053	2.9892	2.9892
3	1.5579	1.5576	4.3131	4.3126
4	2.4105	2.4105	5.6157	5.6157
5	3.2632	3.2632	6.9072	6.9072

ตารางที่ 3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

อัตราส่วนระหว่าง ไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์	
	เปลี่ยนอัตราการไหลของไอน้ำ	เปลี่ยนอัตราการไหลของ คาร์บอนไดออกไซด์
0.5	1.4565	1.7112
1	1.7356	1.7356
2	2.2042	1.7533
3	2.6390	1.7607
4	3.0609	1.7648
5	3.4761	1.7674

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ศักย์ไฟฟ้าผัน กลับได้ (โวลต์)	ศักย์ไฟฟ้า สูญเสีย เนื่องจากความ เข้มข้น (โวลต์)	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสีย เนื่องจากความ ต้านทานไฟฟ้า (โวลต์)	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสีย เนื่องจากปฏิกิริยา เคมี (โวลต์)
550	1.0123	0.0025	0.5813	0.4175
600	0.9971	0.0028	0.4714	0.4036
650	0.9818	0.0030	0.3923	0.3897

ตารางที่ 5 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานต่ออัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์ (กิโลโมลต่อชั่วโมง)
550	0.0840
600	0.0960
650	0.1068

ตารางที่ 6 ผลของความดันดำเนินงานต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

ความดัน (บรรยากาศ)	ศักย์ไฟฟ้าผัน กลับได้ (โวลต์)	ศักย์ไฟฟ้า สูญเสีย เนื่องจากความ เข้มข้น (โวลต์)	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสีย เนื่องจากความ ต้านทานไฟฟ้า (โวลต์)	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสีย เนื่องจากปฏิกิริยา เคมี (โวลต์)
1	0.9818	0.0030	0.3923	0.3897
5	1.0138	0.0010	0.3923	0.3897
10	1.0276	0.0008	0.3923	0.3897

ตารางที่ 7 ผลของความดันดำเนินงานต่ออัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์

ความดัน (บรรยากาศ)	อัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์ (กิโลโมลต่อชั่วโมง)
1	0.1068
5	0.1068
10	0.1068

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานต่ออัตราการไหลของน้ำ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหลของน้ำ (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)	
	สำหรับการผลิตมีเทน	สำหรับการผลิตเมทานอล
40	0.2259	0.2511
45	0.2024	0.2266
50	0.1716	0.1943
55	0.1306	0.1515
60	0.0757	0.0940
65	0.0007	0.0156
70	0.0000	0.0000
75	0.0000	0.0000
80	0.0000	0.0000
85	0.0000	0.0000
90	0.0000	0.0000
95	0.0000	0.0000
100	0.0000	0.0000

ตารางที่ 9 ผลของความดันดำเนินงานต่ออัตราการไหลของน้ำ

ความดันดำเนินงาน (บรรยากาศ)	อัตราการไหลของน้ำ (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)	
	สำหรับการผลิตมีเทน	สำหรับการผลิตเมทานอล
1	0.2437	0.2698
2	0.2711	0.2984
3	0.2798	0.3075
4	0.2842	0.3120
5	0.2867	0.3147
6	0.2884	0.3165
7	0.2897	0.3178
8	0.2906	0.3187
9	0.2913	0.3195
10	0.2918	0.3201

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานต่ออัตราการไหลของมีเทน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหลของมีเทน (กิโลโมลต่อชั่วโมง)
250	0.1970
260	0.1964
270	0.1956
280	0.1948
290	0.1938
300	0.1928
310	0.1916
320	0.1903
330	0.1889
340	0.1874
350	0.1857
360	0.1839
370	0.1820
380	0.1799
390	0.1777
400	0.1754

ตารางที่ 11 ผลของความดันดำเนินงานต่ออัตราการไหลของมีเทน

ความดันดำเนินงาน (บรรยากาศ)	อัตราการไหลของมีเทน (กิโลโมลต่อชั่วโมง)
1.0	0.1970
1.5	0.1976
2.0	0.1980
2.5	0.1982
3.0	0.1983

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 12 ผลของอุณหภูมิดำเนินงานต่ออัตราการไหลของเมทานอล

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหลของเมทานอล (กิโลโมลต่อชั่วโมง)
250	0.1025
260	0.0911
270	0.0790
280	0.0668

ตารางที่ 13 ผลของความดันดำเนินงานต่ออัตราการไหลของเมทานอล

ความดันดำเนินงาน (บรรยากาศ)	อัตราการไหลของเมทานอล (กิโลโมลต่อชั่วโมง)
60	0.1025
61	0.1034
62	0.1043
63	0.1052
64	0.1061
65	0.1070
66	0.1078
67	0.1086
68	0.1094
69	0.1102
70	0.1110
71	0.1118
72	0.1125
73	0.1132
74	0.1140
75	0.1147
76	0.1154
77	0.1160
78	0.1167
79	0.1174
80	0.1180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้